

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra robotiky**

## **Návrh manipulátoru pro diagnostiku a čištění výměníků tepla**

### **Suggestion of Manipulator for a diagnostic and Cleaning of heat exchangers**

Student:

Bc. Martin Ryšavý

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Mihola, Ph.D.

Ostrava 2015

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Ryšavý**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T013 Robotika  
Téma: **Návrh manipulátoru pro diagnostiku a čištění výměníků tepla**  
**Suggestion of Manipulator for a Diagnosis and Cleaning of Heat Exchangers**

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te analýzu současného stavu řešené problematiky.
2. Na základě této analýzy navrhnete možné varianty řešení a proved'te jejich srovnání.
3. Vybranou variantu detailně rozpracujte.
4. Práci doplňte podrobnou technickou a výpočtovou dokumentací. Výkresovou dokumentaci vypracujte dle pokynů vedoucího práce.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému (dle pokynů vyučujícího).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Kárník, L., Knořlíček, R., Marcinčin, J. N. *Mobilní roboty*. Opava: MÁRFY SLEZSKO, 2000. 210 s. ISBN 80-902746-2-5.
2. Schraft, R.F., Volz, H. *Serviceroboter*. Springer – Verlag, Berlin, 1996.
3. Kárník, L. *Robotizace v nestrojírenských oborech*. VŠB-TUO, Ostrava, 2000, 66 s. ISBN 80-7078-739-2.
4. Talácko, J.-Matička, R. *Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů*. ČVUT, Praha, 1995. 236 s. ISBN 80-01-01291-3.
5. ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
6. ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Mihola, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



prof. Dr. Ing. Petr Novák  
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 18.5.2015 .....

  
.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́еднано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́еднано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2015 .....

.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Martin Ryšavý

Adresa trvalého pobytu autora práce: Markova 18, Ostrava – Zábřeh, 70030

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

RYŠAVÝ, M, Návrh manipulátoru pro diagnostiku a čištění výměníků tepla: diplomová práce. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Robotiky, 2015, 75 s, Vedoucí práce: Ing. Milan Mihola Ph.D.

Diplomová práce se zabývá návrhem manipulátoru pro měření a čištění výměníků tepla pod vodou. V úvodu jsou srovnány jednotlivé technologie čištění, popsán čištěný výměník tepla. Byl vytvořen požadavkový list a navrženy jednotlivé varianty řešení. Z těchto řešení byla hodnotovou analýzou určena nejvhodnější varianta. Další část je věnována rozpracování varianty, realizovanou laserovým měřičem a tryskou, která čistí tlakovou vodou. Byl navržen manipulátor, schopný automatického čištění pod vodní hladinou. Byla zpracována výkresová dokumentace vybraných konstrukčních částí a vytvořen 3D model manipulátoru v programu PTC Creo .

RYŠAVÝ, M. Suggestion of Manipulator for a diagnostic and Cleaning of heat exchangers: Master Thesis. Ostrava, VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2015, 72 s. Thesis head: Ing. Milan Mihola Ph.D.

Master thesis focuses on design of manipulator enable to diagnostic testing and cleaning of heat exchangers. The introduction shows contemporary technological capabilities of cleaning and describes heat exchanger. There was created list of requirements and design solutions was made. Value analysis shown most suitable design solution. The next part elaborates on the final solution which is consist of laser sensor, and water pressure cleaning. There was designed manipulator which is capable of automatic cleaning and long cleaning under water. There was drawn technical documentation of chosen parts and created 3D model of the manipulator in program PTC Creo.

**Obsah**

0	Úvod.....	10
1	Analýza současného stavu .....	11
1.1	Způsoby čištění .....	11
1.2	Podvodní manipulace .....	14
1.3	Stupně krytí .....	15
1.5	Těsnění .....	16
1.6	Měření vzdálenosti .....	17
1.7	Kinematické struktury .....	19
2	Požadavkový list .....	20
3	Čištěný objekt .....	21
4	Varianty řešení .....	22
4.1	Varianta A – vnější konstrukce, kartáč .....	22
4.2	Varianta B - vnější konstrukce, tryska .....	25
4.3	Varianta C – vnitřní konstrukce, kartáč .....	28
5	Výběr optimální varianty .....	32
5.1	Hodnoty kritérií .....	32
5.2	Hodnoticí kritéria .....	32
5.4	Určení významnosti metodou porovnání trojúhelníku páru.....	33
5.5	Určení váhy významnosti .....	34
5.6	Hodnocení jednotlivých variant .....	35

6	Vypracování vybrané varianty .....	37
6.1	Laser .....	37
6.2	Tryska .....	45
6.3	Rotace efektoru .....	48
6.4	Konstrukce nad vodou .....	54
6.5	Vedení kabelů, přívodních kapalin a plynů a kabelů .....	59
6.6	Přívody energií .....	61
6.7	Pohyb jednotlivých částí .....	62
6.8	Montáž: .....	68
7	Závěr .....	69
8	Seznam použitých pramenů .....	71
9	Seznam použitých obrázků .....	74
10	Seznam příloh .....	76
11	Přílohy .....	77

**Seznam použitého značení**

$a_c$	Zrychlení středové části	[m.s <sup>-2</sup> ]
$a_c$	Zrychlení ramena	[m.s <sup>-2</sup> ]
$a_l$	Zrychlení laseru	[m.s <sup>-2</sup> ]
$a_r$	Zrychlení polohovacího sloupku	[m.s <sup>-2</sup> ]
$a_t$	Zrychlení trysky	[m.s <sup>-2</sup> ]
$a_v$	Zrychlení lineárního pohonu LA36	[m.s <sup>-2</sup> ]
$C_0$	Součinitel odporu pro kruhový tvar tělesa	[-]
$d_0$	Celková dráha efektoru	[rad]
$d_v$	Průměr válce	[m]
$F_g$	Tíhová síla ramena	[N]
$F_{str}$	Odpor proti pohybu středové části	[N]
$F_v$	Výsledná síla působící na rameno	[N]
$F_{v1}$	Minimální síla lin. Pohonu v laseru	[N]
$F_{vz}$	Vztlková síla	[N]
$g$	gravitační zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$h$	Pracovní hloubka	[m]
$k$	Součinitel bezpečnosti	[-]
$k_1$	Koeficient rozběhu	[-]
$k_2$	Koeficient provedení konstrukce	[-]
$l_1$	Vzdálenost působení výsledné síly od polohovacího sloupku	[m]
$m_1$	Hmotnost laserového měřiče	[kg]
$M_{d1}$	Minimální výstupní moment pohonu bez odporů prostředí	[Nm]
$m_e$	Hmotnost ramena, efektoru a přívodů	[kg]
$m_{ef}$	Hmotnost efektoru	[kg]
$M_{ol}$	Odporový moment laseru při otáčení efektoru	[Nm]
$M_{ot}$	Odporový moment trysky při otáčení efektoru	[Nm]
$M_p$	Moment vyvolaný 6m ramenem a efektozem a přívody	[Nm]
$m_{str}$	Hmotnost středové části	[kg]
$p$	Tlak v hloubce 6m	[Pa]
$p_0$	Atmosférický tlak	[Pa]
$p_r$	Tlak s bezpečností	[Pa]
$r$	Vzdálenost těžiště od osy rotace efektoru	[m]
$r_l$	Vzdálenost středové osy laseru od středu otáčení	[m]
$r_t$	Vzdálenost středové osy trysky od středu otáčení	[m]
$s_{cu}$	Dráha ramena při ustálené rychlosti	[mm]
$S_l$	Průřez obalu laserového měřiče	[m <sup>2</sup> ]
$s_{lu}$	Dráha laseru při ustálené rychlosti	mm
$s_{ru}$	Dráha polohovacího sloupku při ustálené rychlosti	[mm]



$S_{str}$	Plocha odporu středové části	$[m^2]$
$S_t$	Průřez obalu laserového trysky	$[m^2]$
$s_{tu}$	Dráha trysky při ustálené rychlosti	$[mm]$
$S_v$	Průřez válce	$[m^2]$
$t_{ce}$	Čas rotace efektoru o $180^\circ$	$[s]$
$t_{cl}$	Celkový čas vyjetí laserového měřiče	$[s]$
$t_{cr}$	Celkový čas vyjetí efektoru	$[s]$
$t_{ct}$	Čas vyjetí trysky do pracovní polohy	$[s]$
$t_{ct}$	Čas přejetí nad další clonku	$[s]$
$v_c$	Rychlost středové části	$[m.s^{-1}]$
$v_c$	Rychlost ramena	$[m.s^{-1}]$
$V_e$	Objem efektoru, nosného ramena a přívodů pod vodou	$[m^3]$
$v_l$	Rychlost laserového měřiče	$[m.s^{-1}]$
$v_l$	Rychlost zdvihu laseru	$[m.s^{-1}]$
$v_r$	Rychlost zdvihu polohovacího sloupku	$[m.s^{-1}]$
$v_t$	Rychlost trysky	$[m.s^{-1}]$
$v_t$	Rychlost zdvihu trysky	$[m.s^{-1}]$
$\varepsilon_e$	Zrychlení efektoru	$[m.s^{-2}]$
$\rho$	Hustota vody	$[kg.m^{-3}]$
$\varphi_{eu}$	Dráha efektoru při ustálené rychlosti	$[rad]$
$\omega$	Úhlová rychlost efektoru	$[rad.s^{-1}]$

## 1 Úvod

V dnešní době dochází v čím dál větší míře ke zpřísňování norem pro ochranu a bezpečnost práce v nezdravých provozech. Z toho důvodu se zvyšuje požadavek na aplikaci robotů do prostředí, která jsou pro člověka škodlivá, nebo špatně přístupná. Jejich použití můžeme vidět jak při monitorování budov, tak při zkoumání tunelů nebo práci pod vodou.

Cílem diplomové práce je navrhnout konstrukci automatického manipulátoru pro měření a čištění tepelného výměníku. V úvodu se práce zabývá jednotlivými technologiemi čištění a navržením variant řešení, ze kterých je následně hodnotovou analýzou vybrána výsledná varianta. Ta je v další části rozpracována a vymodelována v 3D prostředí.

## 2 Analýza současného stavu

Tepelný výměník je provozován pod vodou a zde je taky umístěn hlavní prvek systému, který je potřeba čistit. Jedná se o nerezovou clonku, která zajišťuje konstantní průtok vody. Clonka se postupem času zanáší usazeninami, čímž se snižuje požadovaný průtok.

### 2.1 Způsoby čištění

Čištění tepelných výměníků lze rozdělit na mechanické a chemické. Použití obou metod závisí na odstraňované nečistotě, materiálu výměníku a přístupnosti k čištěným prostorům. Rozdělit metody můžeme také na „online“ a „offline“. Online metody dokáží čistit bez demontování výměníku, pouze se popřípadě přepojí na jiný okruh. Při použití offline metod je nutno výměník zcela demontovat a vyčistit mimo jeho pracovní prostor.

#### Kartáčem

Metoda spočívá v použití kartáče pro odstranění nečistot. Výhodou je široký výběr kartáčů pro různé druhy usazenin od organických nečistot po vodní kámen i povrchy čištěných stěn. Metodu je možné aplikovat pro potrubí až do průměru 300 mm. Nevýhodou je nutnost volby materiálu štětin o nižší tvrdosti, než je čištěný materiál, s tím spojené rychlejší opotřebení kartáče a jeho častější výměna, což může být problém v místech se špatným přístupem. [1,2]

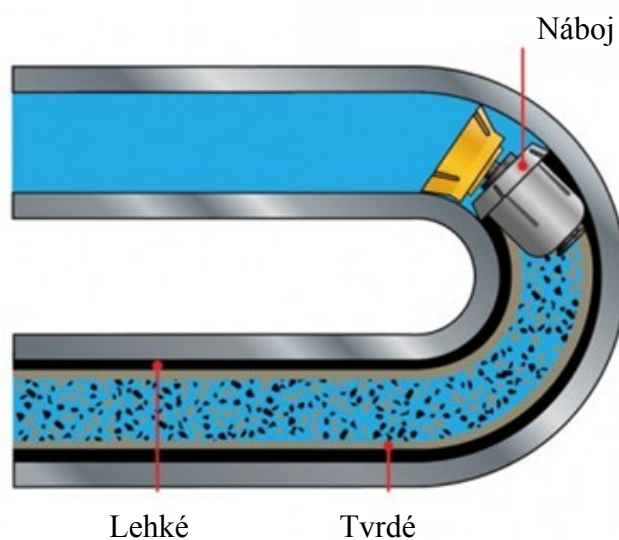
Tato metoda je často používána s tlakem vody, nebo vzduchu, který zajišťuje odvod nečistot.



Obrázek 1 - vyměnitelné kartáče [2]

## Nábojem

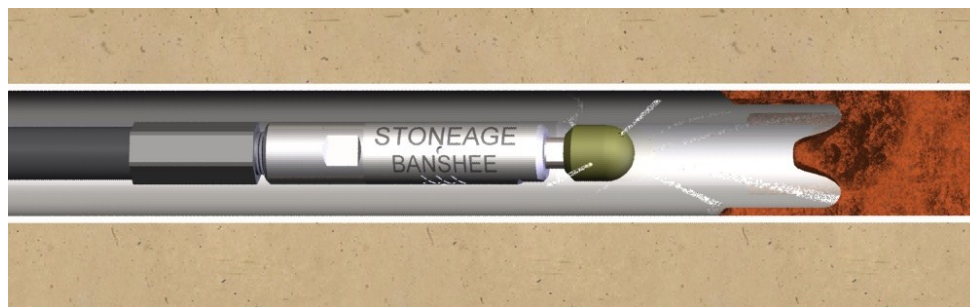
Metoda vhodná pro menší průměry potrubí, převážně do 35 mm a U trubice, kde je potíží dostat se do záhybů. Čištění je prováděno mechanicky. Do potrubí je zasunut projektil a za něj se pomocí pistole přivede tlaková voda. Ta tlačí náboj vpřed a ten svou konstrukcí odstraní nečistoty. Nevýhodou je rychlé opotřebování projektilu. Životnost jednoho kusu se obvykle pohybuje od 2 do 12 opakování v závislosti na použitém typu projektilu a stavu potrubí. Projektily lze použít jak pro odstranění měkkých nečistot, tak pro odstranění např. vodního kamene. [3]



Obrázek 2 - čištění projektilém [4]

## Tryskou

Čištění tryskami je mechanické čištění, použitelné pro průměr potrubí od 12 do 60 mm. Metoda je vhodná pro odstranění měkkých i tvrdých nečistot, jaké jsou např. vodní kámen. Čištění je provedeno vložím trysky do potrubí a jejím postupným posunem až nakonec potrubí. Tlak vody vycházející z trysky odstraní usazené nečistoty. Nevýhodou je potřeba výměny hlavice trysky v závislosti na čistotě protékající vody. Výhoda metody spočívá v širokém výběru trysek pro jednotlivá použití a automatický odvod nečistot tlakem vody. [5,6]



Obrázek 3 - čištění tryskami [7]

### Chemicky

K rozpouštění nečistot je použito kyselin, nebo jiných chemických přípravků. V uzavřeném i otevřeném okruhu se musí často podstoupit následující kroky:

- Oplach pro odstranění největších nečistot
- Zahřátí a cirkulace vody
- Vpuštění čistícího přípravku, popřípadě inhibitoru
- Po dostatečném čase vpuštění neutralizačního přípravku a pročištění celého systému
- Pasivace povrchu
- Propláchnutí a odstranění všech stop čistících prostředků

Hlavní nevýhodou chemického čištění je náročnost na ochranu pracovníka před čistícím přípravkem. Protože se zde používají kyseliny (např. kyselina chlorovodíková) je nutné je ekologicky odstranit. V závislosti na materiálu čištěného potrubí musí být zvoleno vhodné rozpouštědlo, které nepoškodí samotné trubky. Výhodou je poměrně nízká cena, delší intervaly mezi jednotlivým čištěním. Tato metoda je také vhodná pro čištění nedostupných oblastí. [8,9,10,11]



Obrázek 4 - stav po chem. Čištění [12]



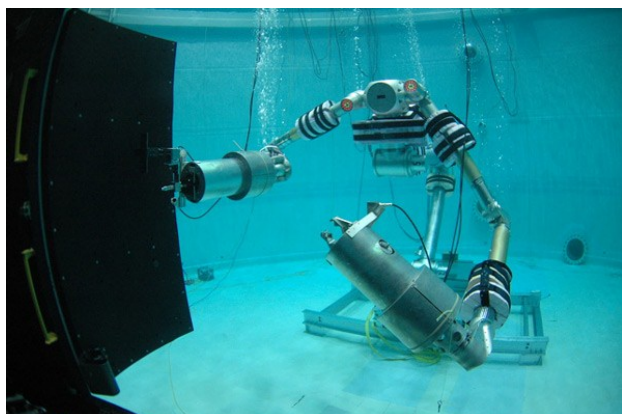
Obrázek 5 - stav před chem. Čištěním [12]

Používané kyseliny:

- Kyselina chlorovodíková
- Kyselina fluorovodíková
- Kyselina sírová
- Kyselina dusičná
- Kyselina octová
- Kyselina citrónová

## 2.2 Podvodní manipulace

V podvodní manipulaci je kladen velký důraz na dobré utěsnění všech komponentů, které by se mohly při styku s vodou, nebo vlhkostí poškodit. Tlak působící na zařízení se s hloubkou zvětšuje a nemusí tedy stačit jen standardní těsnění. Z tohoto důvodu se



Obrázek 6 - Podvodní robot [13]

tam, kde je to nutné, využívá přetlaku vnitřních prostor. Přetlak tak brání kapalině ve vniku, i když těsnění vodu dokonale neizoluje. Roboty pod vodou ve většině případů nebývají zcela autonomní. Často jsou spojené kabelem se stanovištěm operátora, který je ovládá.

## 2.3 Stupně krytí

Stupeň krytí udává odolnost elektrického zařízení proti vniknutí vody nebo tuhých těles. Kód je složen ze dvou čísel. První označuje odolnost proti vniknutí cizích těles, druhé odolnost proti vniknutí vody. [14]

stupeň	ochrana proti vniknutí předmětů
<b>IP 0x</b>	bez ochrany
<b>IP 1x</b>	velkých
<b>IP 2x</b>	malých
<b>IP 3x</b>	drobných
<b>IP 4x</b>	velni drobných
<b>IP 5x</b>	prachu částečně
<b>IP 6x</b>	prachu úplně

*Tabulka 1 - Ochrana proti vniknutí prachu [14]*

stupeň	ochrana proti vniknutí vody
<b>IP x0</b>	Bez ochrany
<b>IP x1</b>	Chráněno proti padající vodě při ekvivalentu deště 3–5 mm padající vody za minutu v průběhu 10 minut. Jednotka je umístěna ve své pracovní poloze.
<b>IP x2</b>	Chráněno proti padající vodě, když je přístroj v poloze 15 stupňů. Stejně jako IP x1, jen rozdílem, že jednotka je testována ve 4 pozicích, nakloněna o 15° v každé poloze od normální provozní polohy.
<b>IP x3</b>	Chráněno proti vodní tříšti. Voda stříká na přístroj v úhlu 60° vertikálně, v množství 10 litrů za minutu a při tlaku 80–100kN/m <sup>2</sup> po dobu 5 minut.
<b>IP x4</b>	Chráněno proti stříkající vodě. Stejně jako u IP x3, jen s rozdílem, že voda stříká ve všech úhlech.
<b>IP x5</b>	Chráněno proti tryskající vodě. Voda míří 6,3mm tryskou ve všech úhlech při průtoku 12,5 litrů za minutu při tlaku 30 kN/m <sup>2</sup> po dobu 3 minuty ze vzdálenosti 3 metry.
<b>IP x6</b>	Chráněno proti vlnobití. Voda míří 12,5mm tryskou ve všech úhlech při průtoku 100 litrů za minutu při tlaku 100 kN/m <sup>2</sup> po 3 minuty ze vzdálenosti 3 metry.
<b>IP x7</b>	Chráněno proti ponoření do vody. Ponoření na 30 minut do hloubky 1 metr.
<b>IP x8</b>	Chráněno proti potopení do vody. Zařízení je schopné nepřetržitého potopení do vody za podmínek, které určí výrobce zařízení.

*Tabulka 2 - Ochrana proti vniknutí vody [14]*



## 2.5 Těsnění

### Pryž nitril (NBR)

Materiál pro běžné použití s vysokou tažnou silou a odolností proti opotřebení a trvalé deformaci. Vhodný pro použití pro teplotní rozsah – 10 až 100 °C. Pryž disponuje vysokou odolností proti olejům tukům, veškerým druhům minerálů i rozpouštědlům. Naopak se nedoporučuje použití s alkoholy, minerálními kyselinami a chlorovanými hydrokarbidy. [15]

### PTFE

Polymer s vysokou molekulární hmotností pro teplotní rozsah od – 10 do 150 °C. Antiadhezní materiál s nízkým třením, odolný vůči opotřebení. Je částečně inertní v kontaktu s chemickými sloučeninami. Může být znehodnocen pouze alkalickými kovy, fluoridem, při vysoké teplotě atd. [15]

### Silikon

Materiál pro rozsah -50 až 200 °C s vysokou odolností proti atmosférickému stárnutí a dobrou odolností vůči oxidačním činidlům a solným roztokům. Odolává kyselinovým roztokům a živočišným a rostlinným olejům. [15]

### VITON (FTM)

Pro použití v teplotách od -15 do 220 °C. Viton disponuje vysokou odolností proti širokému rozsahu chemikálií, jako jsou minerály, rostlinné a živočišné oleje, benzín, topný olej, chlorované rozpouštědla a kyseliny, a to i při vysokých teplotách. [15]



Obrázek 7 - Těsnění Viton [16]

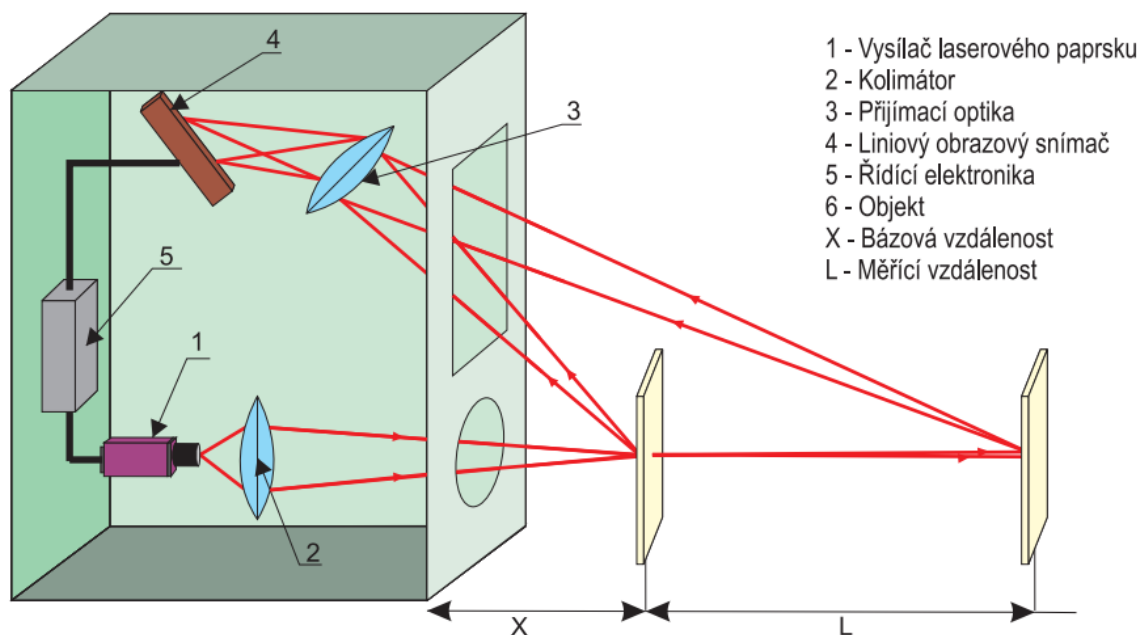


## 2.6 Měření vzdálenosti

Nejrozšířenějšími bezkontaktními metodami k měření vzdálenosti jsou laserové a ultrazvukové metody. V poslední době dochází ke snižování cen laserových měřidel a tudíž k jejich větší aplikaci do praxe. [17]

### Laserové

Laserové měření nahrazuje měření ultrazvukové díky jeho poměrně nízké ceně, přesnosti a pohodlnosti. Princip spočívá v použití laseru, který je umístěn v přístroji. Laserový paprsek, vyslaný z přístroje, ukáže na měřenou plochu a následně vyše puls, který se odrazí. Odražené fotony se zachytí na přístroji a ten vyhodnotí měřenou vzdálenost. [17,19]

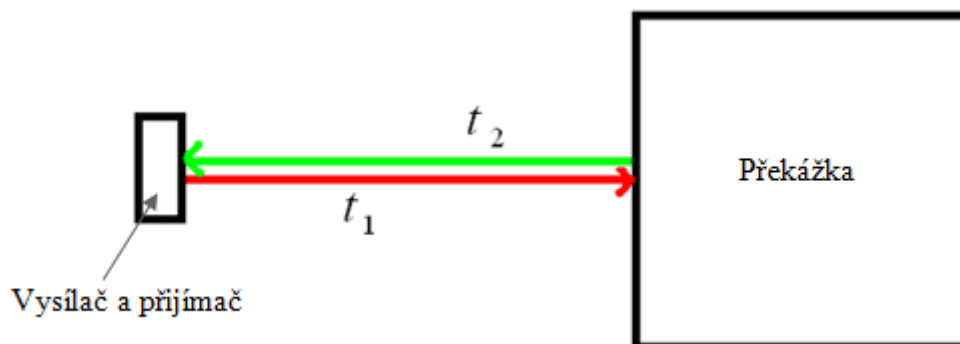


Obrázek 8 – Princip laserového měření [18]

Výhodou je především rychlost a přesnost měření, dále vyšší dosah, možnost kalibrace a malá plocha potřebná k odrazu paprsku. Měření lze provádět také při dopadu na šikmý povrch. Nevýhodou je nespolehlivé měření průhledných ploch. [17]

**Ultrazvukové**

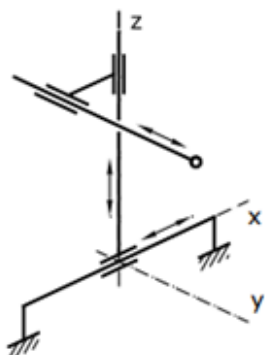
Měřiče, které se používají převážně pro jejich nízkou cenu. Jejich hlavní nevýhoda spočívá hlavně v přesnosti měření, která se pohybuje okolo 0,5 %. Další nevýhodou je potřeba velké měřené plochy, kdy při měření 3m vzdálenosti přístroj potřebuje odraz od plochy průměru 30 cm. Při měření 10 m je potřeba odrazová plocha o průměru cca 1 m. Měřená plocha musí být rovná a kolmá na měřicí přístroj. Oproti laserovým přístrojům měří vzdálenost od skleněných ploch. [17]



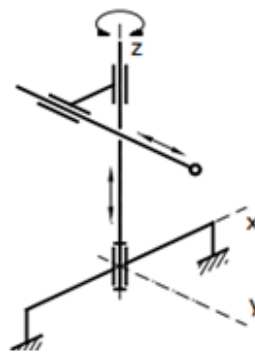
Obrázek 9 - princip ultrazvuku [35]

## 2.7 Kinematické struktury

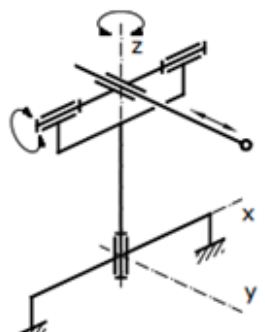
Na obrázku lze vidět používané kinematické struktury průmyslových robotů.



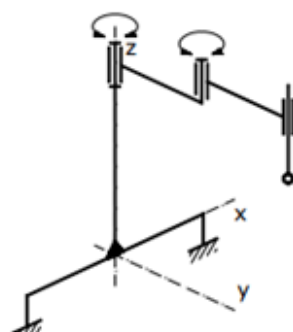
Kinematická struktura  $T_x, T_z, T_y$



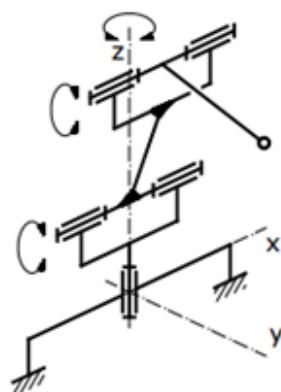
Kinematická struktura  $R_z, T_z, T_y$



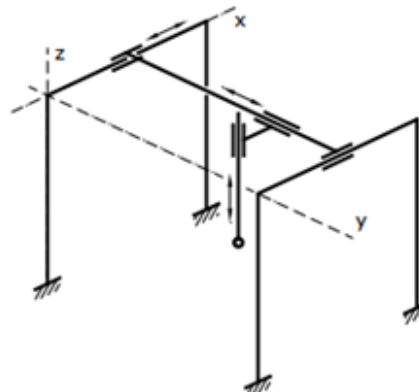
Kinematická struktura  $R_z, R_x, T_y$



Kinematická struktura  $R_z, R_y, T_z$



Kinematická struktura  $R_z, R_x, R_y$



Kinematická struktura  $T_x, T_y, T_z$

Obrázek 10 - kinematické struktury [20]

### 3 Požadavkový list

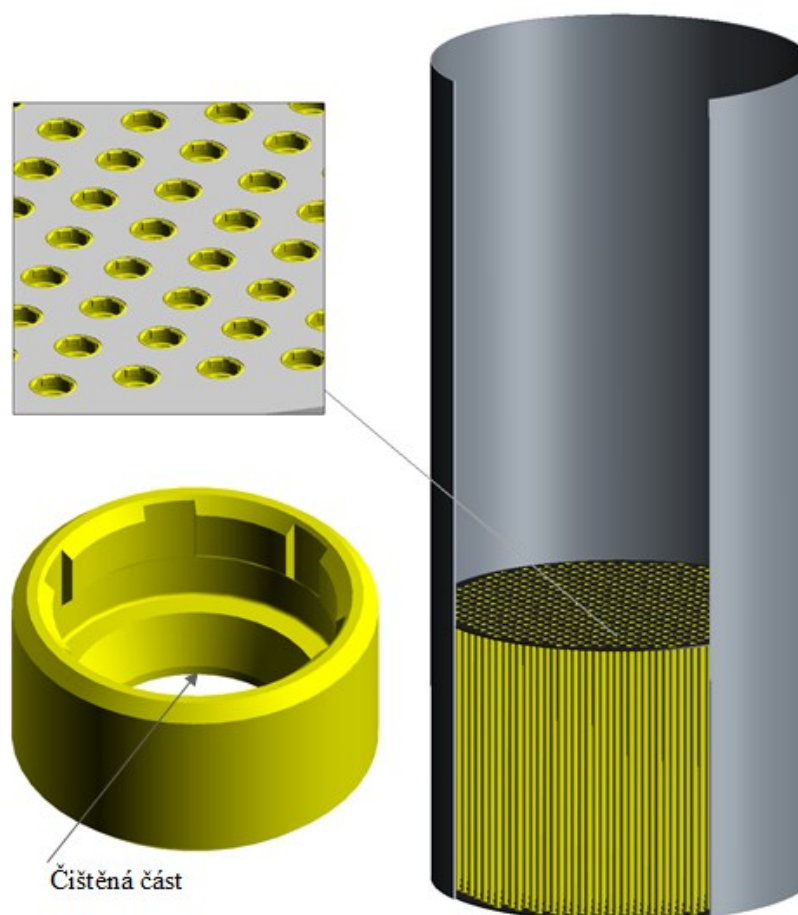
V následující tabulce je výpis základních požadavků na zařízení.

Požadavek	Popis	
Žádaný průměr	50 H7	[mm]
Měřený průměr	47 – 50	[mm]
Práce pod vodou	6	[m]
Čas stroje pod vodou	20	[hod]
Médium	voda	[-]
Odstraňovaný nános	usazeniny	[-]
Měření	laserové	[-]
Konstrukční materiály	nerez slitiny AL	[-]
Čištěný a měřený materiál	nerez	[-]
Těsnicí materiál	Viton Teflon	[-]
Kadence	1 ks/8 min	[-]
Měření průměru před i po čištění		[-]
Automatický režim měření a čištění		[-]
Požadavek zvýšené bezpečnosti – napětí ve vodě		[-]
Minimalizace ceny		[-]
Snadné čištění		[-]
Jednoduché konstrukční plochy		[-]

*Tabulka 3 - požadavkový list*

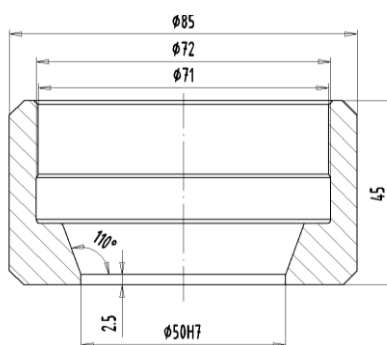
## 4 Čištěný objekt

Čištěným objektem je clonka, umístěná v tepelném výměníku 6 m pod vodní hladinou. Těchto clonek je v tepelném výměníku 595 ks. Celková vnitřní šířka tepelného výměníku je 4 m.



Obrázek 11 – Tepelný výměník

U těchto clonek je potřeba čistit vnitřní spodní průměr na 50H7. Čištěnou plochu lze vidět na obrázku č. 11. Tato plocha může být zanesena až na průměr 47 mm. Výška čištěné části je 2,5 mm.

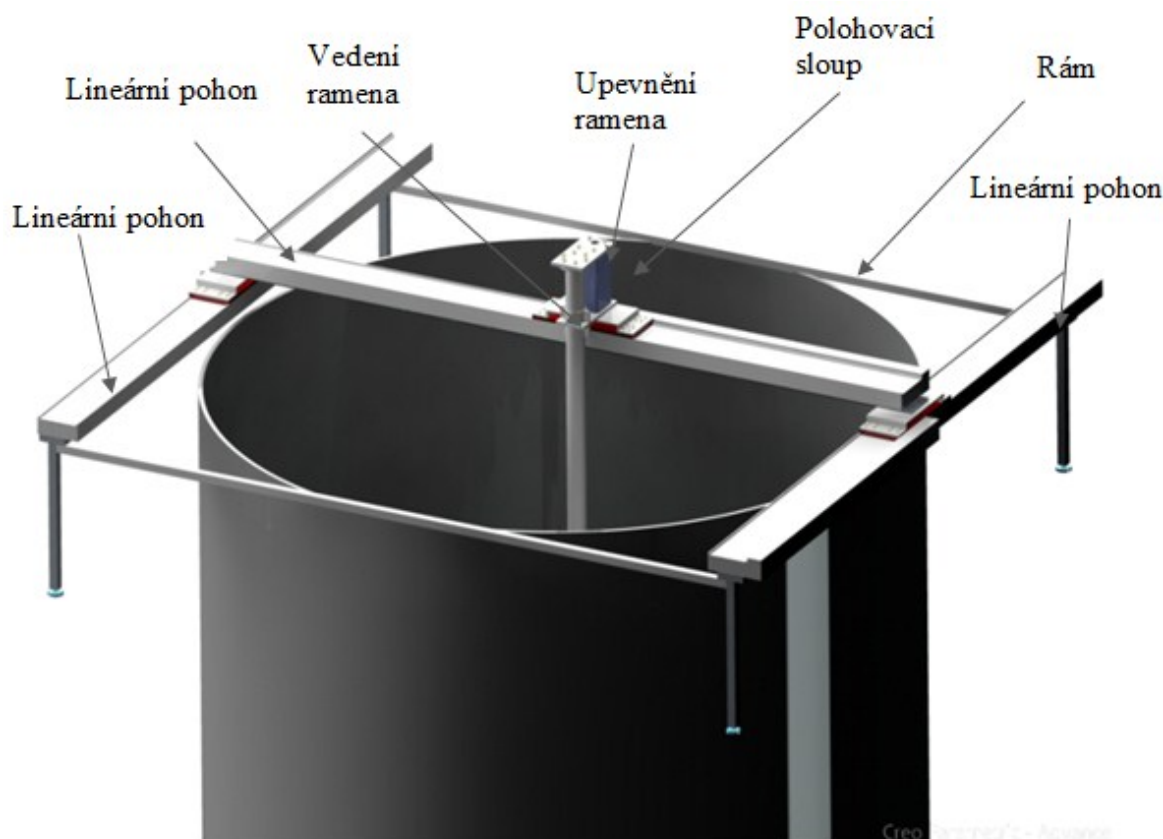


Obrázek 12 - Rozměry clonky

## 5 Varianty řešení

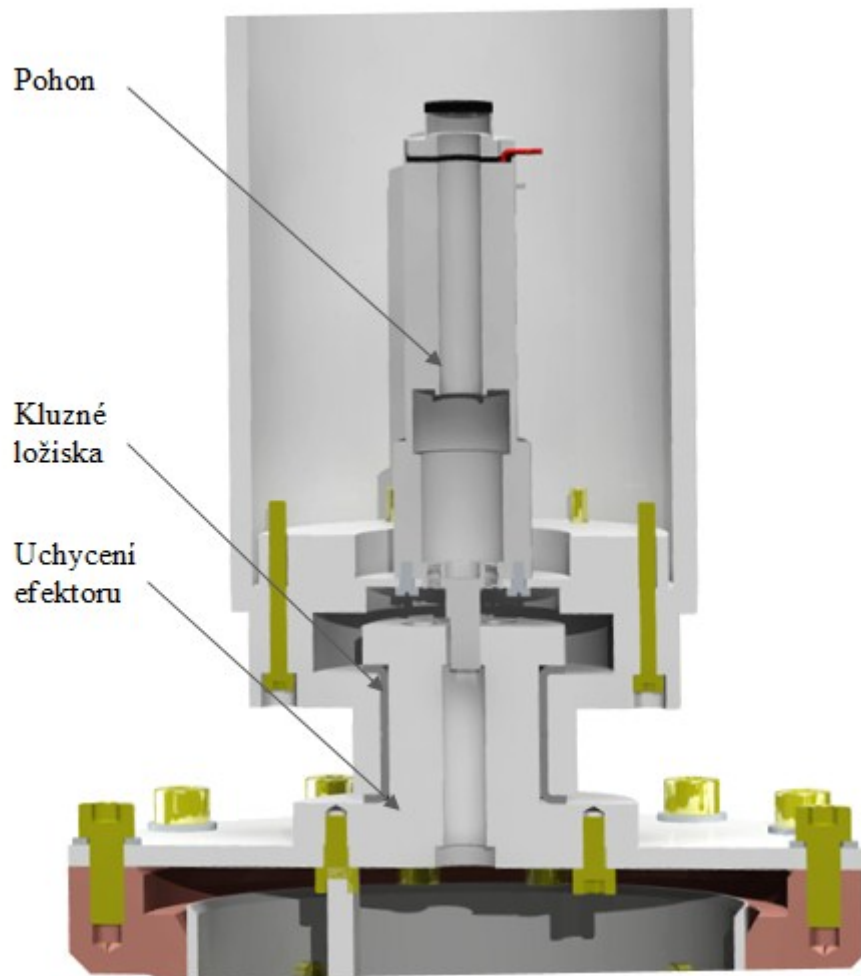
### 5.1 Varianta A – vnější konstrukce, kartáč

Varianta je realizována dvěma pohony, které pohybuji ramenem v ose x. Na těchto pohonech je uložen další lineární pohon pohybujiící ramenem v ose y. Všechny lineární pohony jsou uloženy na rámu z hliníkových profilů. Pohyb v ose „z“ je prováděn polohovacím sloupkem, ke kterému je přes přírubu upevněno rameno. Toto rameno je ze spodní strany pohonu vybaveno vedením kvůli prohnutí ramena při pohybu.



Obrázek 13 - Popis varianty A

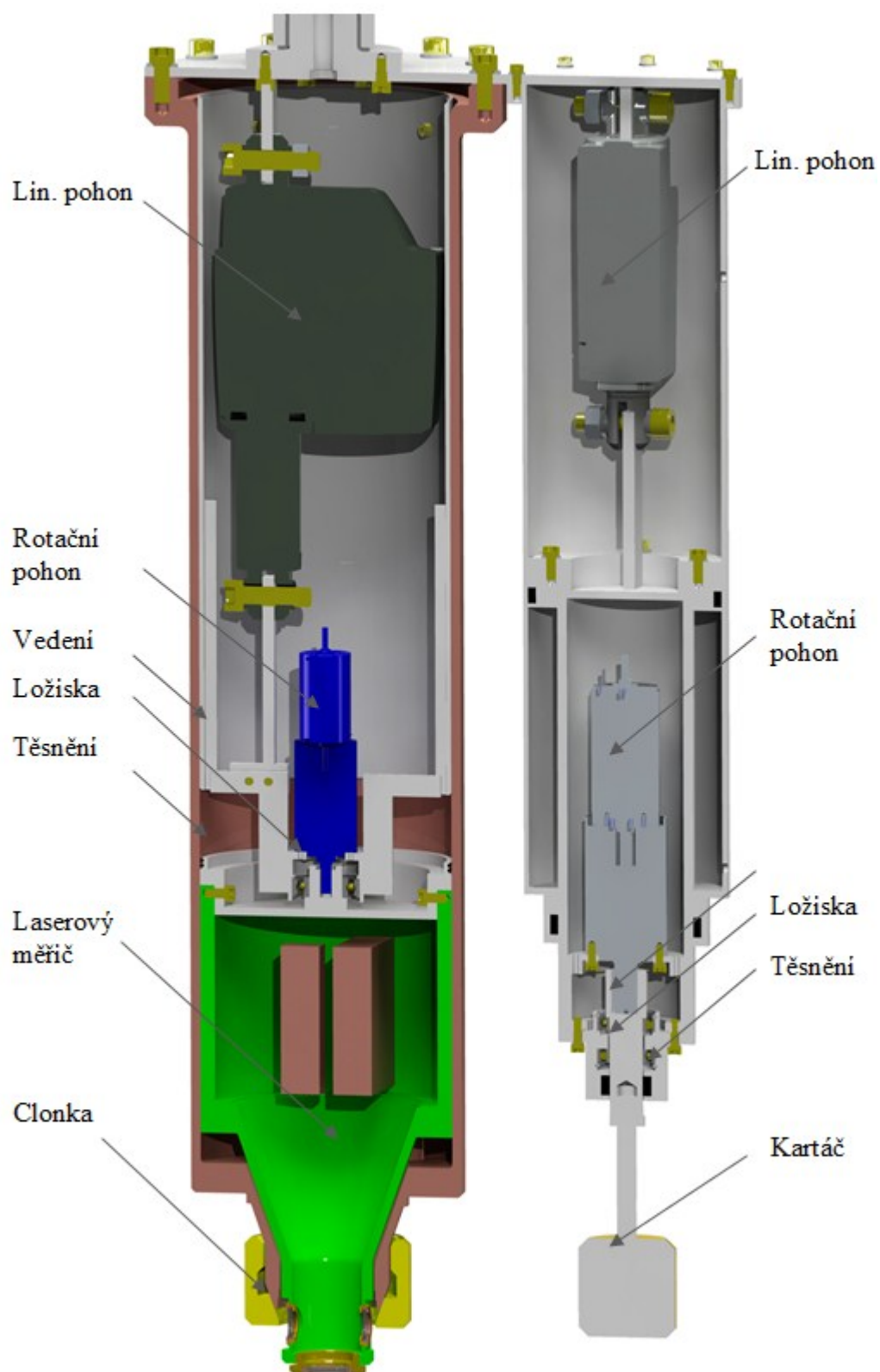
Měřicí i kartáčovou jednotkou lze otáčet z důvodu limitovaného čistícího prostoru. To je provedeno rotační jednotkou, umístěnou v ramenu. Krouticí moment je přenesen hřídelí uchycenou kluznými ložisky.



*Obrázek 14 - Otáčení efektoru*

Efektor se skládá z měřicí části a části čistící. Do obou jednotek je přiveden tlakový vzduch, který vytvoří přetlak a utěsní elektrické zařízení. Měřicí část je tvořena laserovým snímačem. Tento snímač je chráněn proti mechanickému poškození zasunutím lineárního pohonu, umístěném v horní části. Další pohon otáčí laserovým zařízením a umožňuje tak snímat celý obvod clonky. Drážka slouží k vedení posuvného pohybu i zabránění libovolného otáčení měřidla. Měřicí část je upevněna k ramenu přírubou.

Kartáč je vysouván jedním lineárním pohonem. Otáčení kartáče je umožněno rotačním pohonem. Krouticí moment je veden přes hřídel, kde je pomocí závitu upevněn kartáč. Všechny části jsou vybaveny těsněními. Kartáčová část je připevněna k ramenu přírubou.



Obrázek 15 – Popis efektoru s kartáčem



Přednosti:

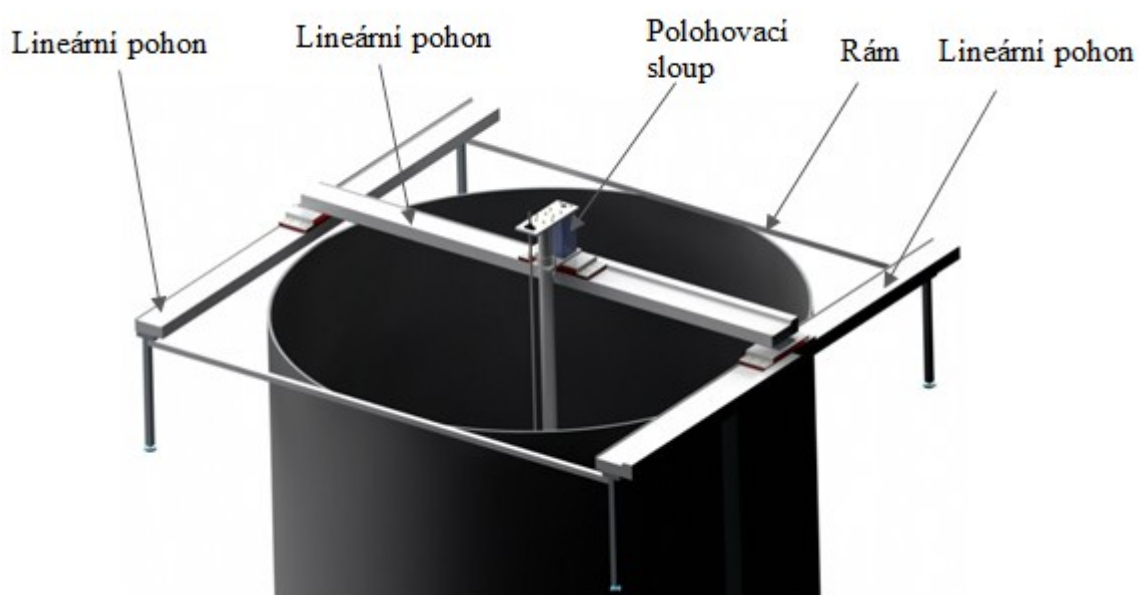
- Jednoduchost konstrukce
- Přesnost polohování
- Počet pohonných jednotek
- Možnosti těsnění
- Jednoduchá smontovatelnost

Nevýhody:

- Cena lineárních pohonů
- Nutnost výměny kartáče při jeho opotřebení
- Průhyb ramena při pohybu

## 5.2 Varianta B - vnější konstrukce, tryska

Varianta je realizována dvěma pohony, které pohybují ramenem v ose „x“. Na těchto pohonech je uložen další lineární pohon, pohybující ramenem v ose „y“. Všechny lineární pohony jsou uloženy na rámu z hliníkových profilů. Pohyb v ose „z“ je prováděn polohovacím sloupkem, ke kterému je přes přírubu upevněno rameno. Toto rameno je ze spodní strany pohonu vybaveno vedením k omezení prohnutí při pohybu.



Obrázek 16 - Popis varianty B

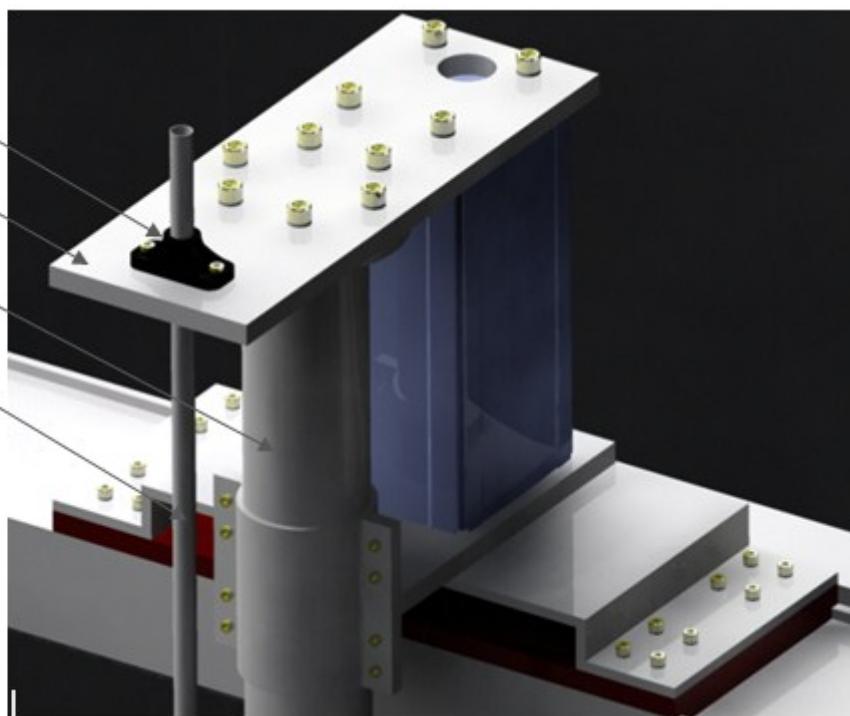
Paralelně k potrubí se nachází trubka pro přívod tlakové vody. Ta je v horní části uložena v ložiskovém domečku, který umožňuje naklonění trubky při otočení efektoru o 180°.

Ložiskový domeček

Upevnění ramena

Rameno

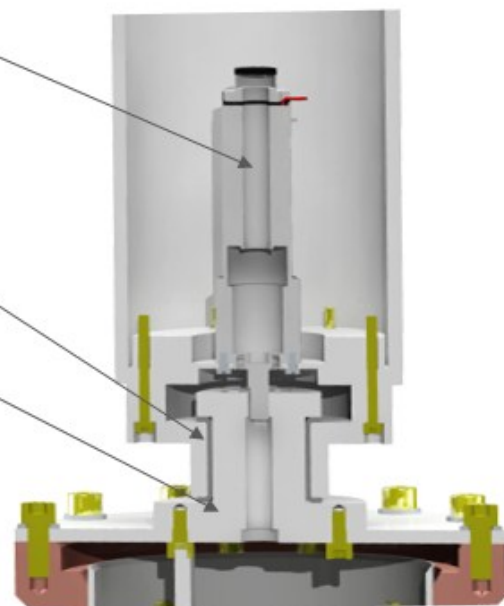
Přívodní trubka



Obrázek 17 - Upevnění ramena

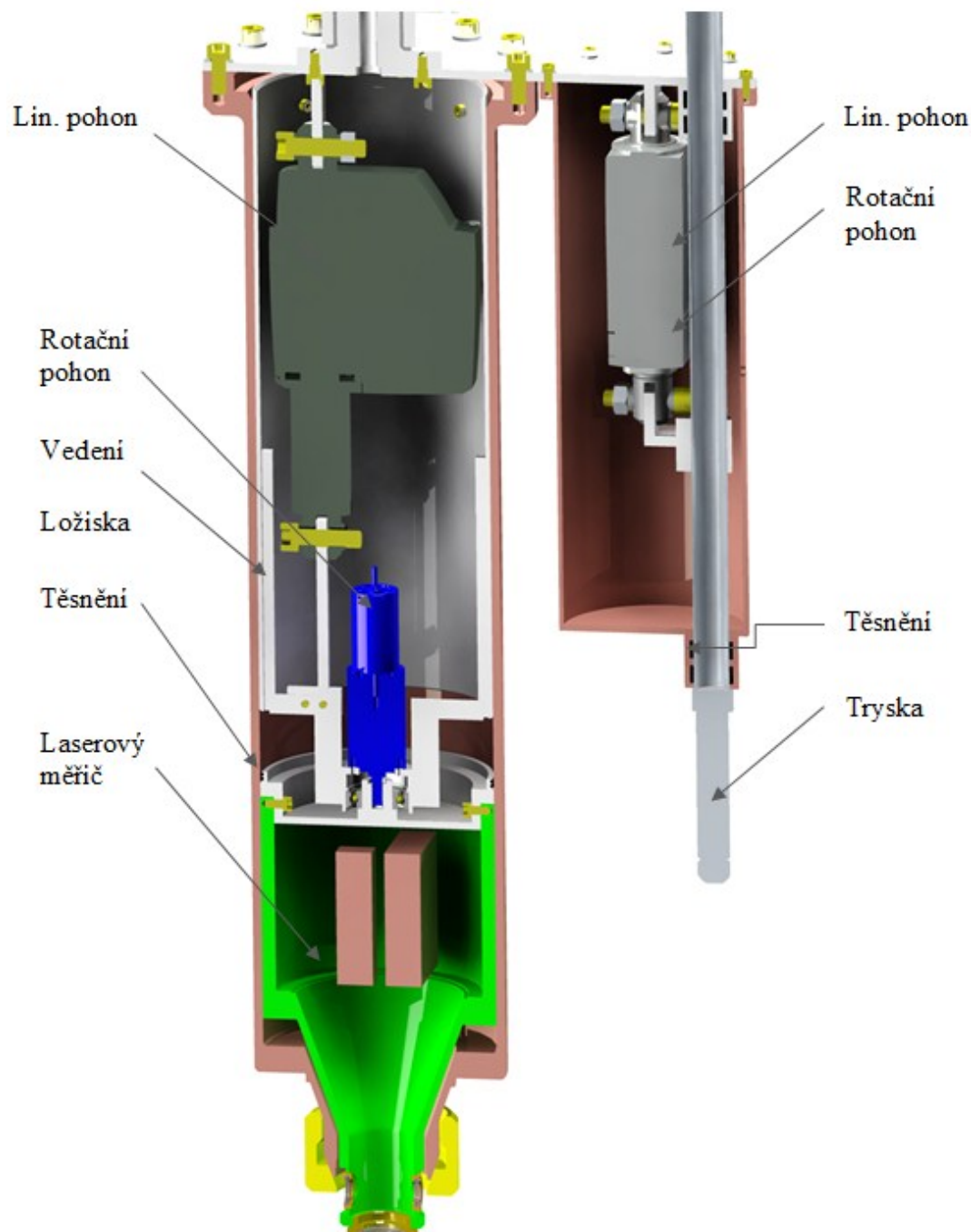
Měřicí i kartáčovou jednotkou lze otáčet z důvodu limitovaného čistícího prostoru. To je provedeno rotační jednotkou, umístěnou v ramenu. Krouticí moment je přenesen hřídelí uchycenou kluznými ložisky.

Pohon

Kluzná  
ložiskaUchycení  
efektoru

Obrázek 18 - Otáčení efektoru

Efektor se skládá z měřicí a čistící části. Do obou jednotek je kvůli dobrému utěsnění elektrických zařízení přiveden tlakový vzduch. Měřicí část je tvořena laserovým snímačem. Tento snímač je chráněn proti mechanickému poškození zasunutím lineárního pohonu, umístěnému v horní části. Další pohon otáčí laserovým zařízením a umožňuje tak snímat celý obvod clonky. Drážka slouží k vedení posuvného pohybu i zabránění libovolného otáčení měřidla. Měřicí část je upevněna k ramenu přírubou.



Obrázek 19 - Popis efektoru s tryskou

Tryska je připojena přírubou k lineárnímu pohonu šrouby. Tím je umožněno její vysouvání a zasouvání. Konec trysky se samovolně otáčí po přivedení tlaku vody.

Přednosti:

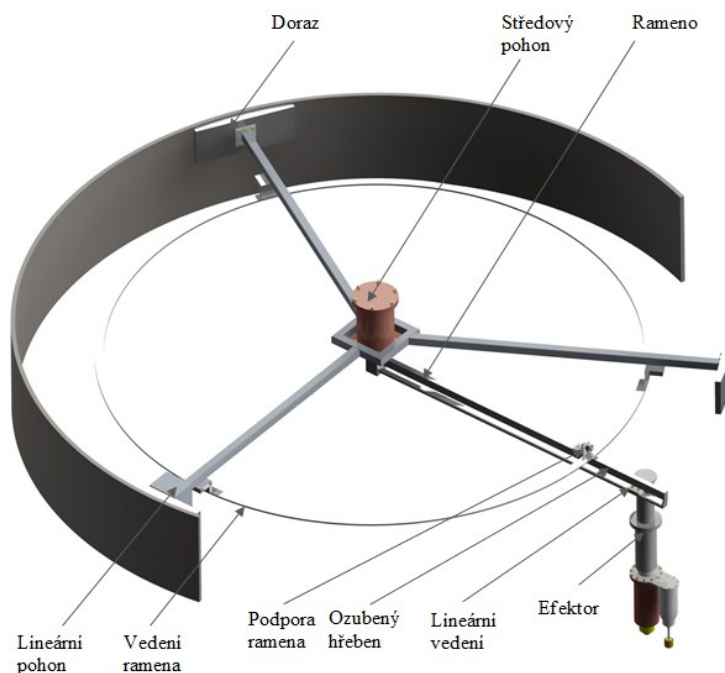
- Jednoduchost konstrukce
- Přesnost polohování
- Počet pohonných jednotek
- Možnosti těsnění
- Jednoduchá smontovatelnost

Nevýhody:

- Cena lineárních pohonů
- Průhyb ramena při pohybu

### 5.3 Varianta C – vnitřní konstrukce, kartáč

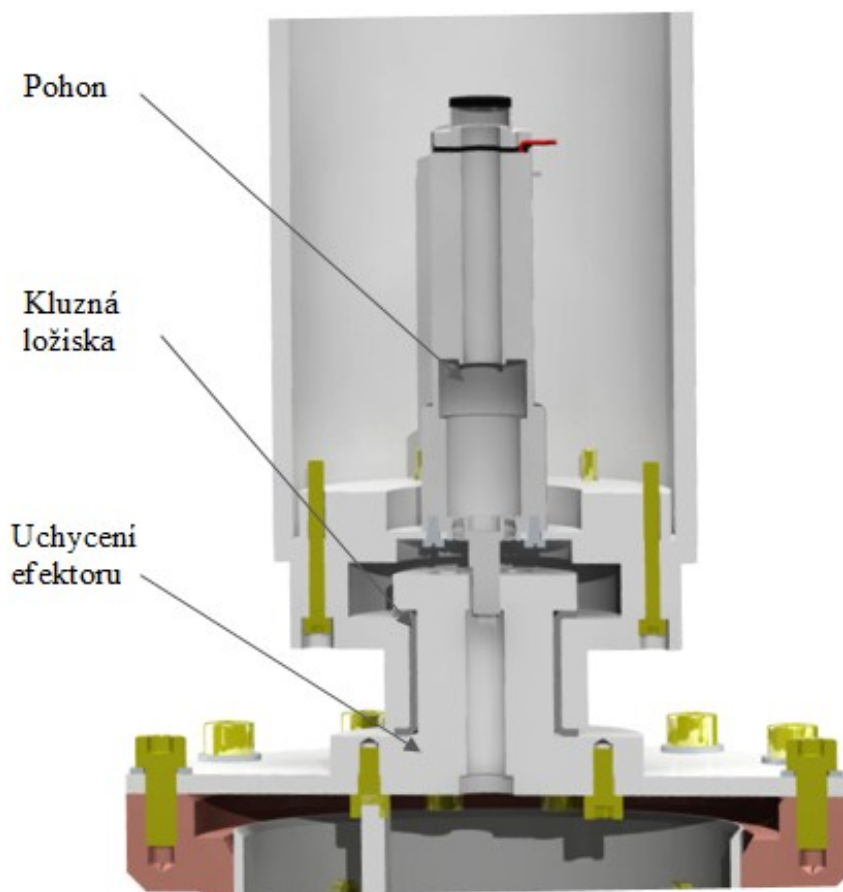
Varianta C je tvořena nosnou konstrukcí z profilů. Profily jsou zakončeny dvěma pevnými dorazy a jedním posuvným dorazem, který stabilizuje celé zařízení poté, co je spuštěno pomocí třech navijáků. Navijáky spustí zařízení do požadované hloubky a po celou dobu nesou konstrukci. U této aplikace je nutné, aby celá konstrukce byla ve vodorovné poloze. To je zajištěno měřením inklinometrem, umístěným ve středu zařízení spolu s rotačním pohonem, který otáčí ramenem. Rameno je tvořeno ozubeným hřebenem a lineárním vedením, po kterém se pohybuje efektor. Průhyb ramena je omezen vedením, tvořeným z nerezových kuličkových ložisek.



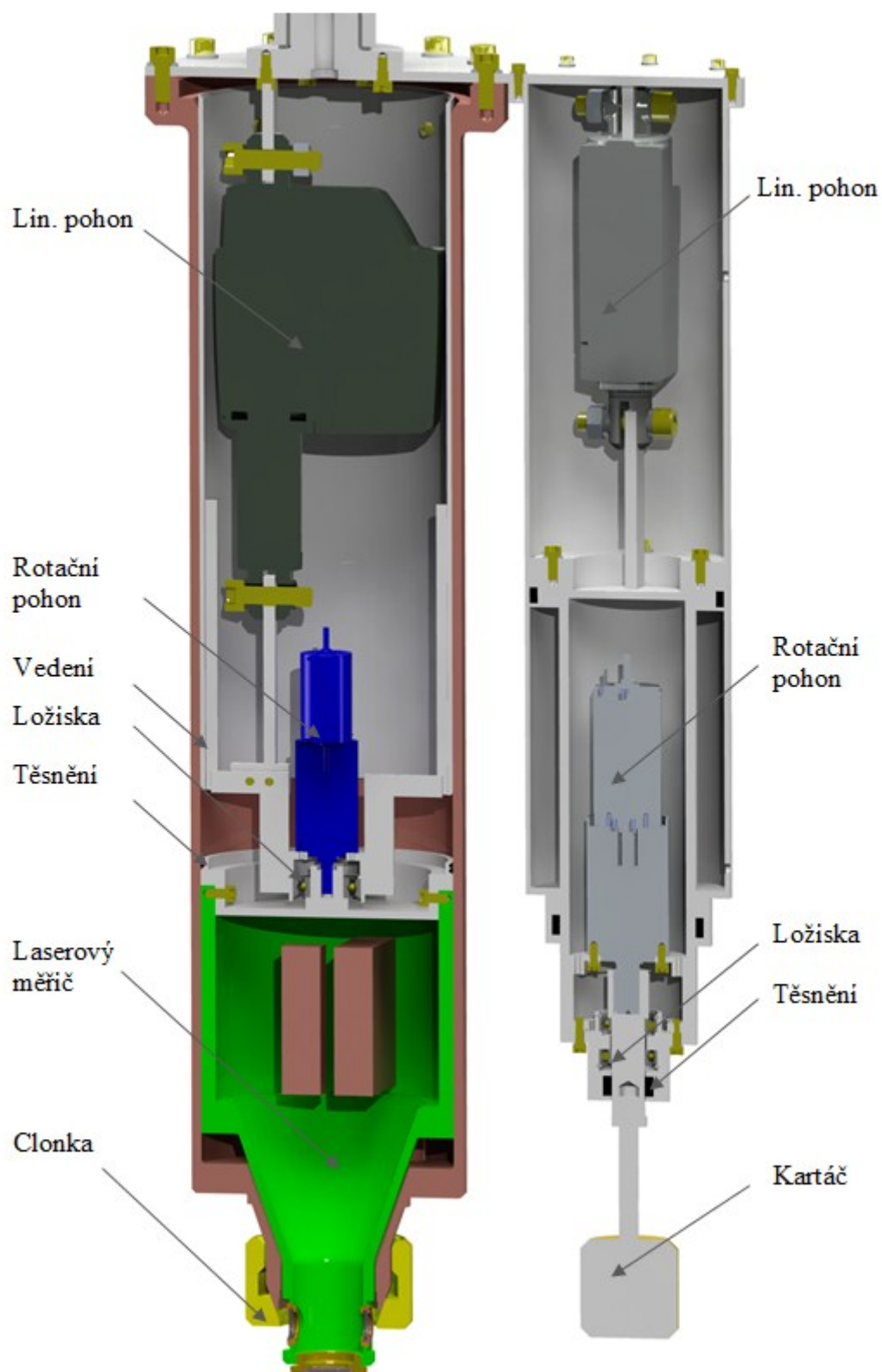
Obrázek 20 - Popis varianty C

Efektor se skládá z měřicí části a části čisticí. Do jednotek přiveden tlakový vzduch, který zajišťuje těsnost. Měřicí část je tvořena laserovým snímačem. Snímač je chráněn proti mechanickému poškození zasunutím lineárního pohonu. Rotační pohon otáčí laserovým zařízením a umožňuje tak clonku po celém obvodu. Drážka slouží k vedení posuvného pohybu a zabránění libovolného otáčení měřidla. Měřicí část je upevněna k ramenu přírubou.

Výsuv kartáče je umožněn lineárním pohonem. Otáčení kartáče zajišťuje rotační pohon. Krouticí moment je veden přes hřídel, kde je pomocí závitu upevněn. Všechny části jsou vybaveny těsněními. Kartáčová část je připevněna k ramenu přírubou.

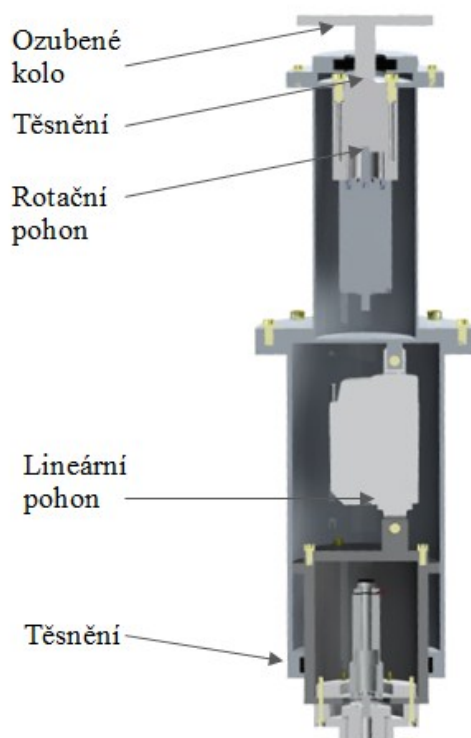


*Obrázek 21 – Rotační pohon ramena*



Obrázek 22 – Popis efektoru s kartáčem

Nad rotačním pohonem ramena je umístěn lineární pohon pro zvedání celého efektoru. Celá konstrukce efektoru je umístěna na lineárním vedení a pohybuje se po ramenu pomocí ozubeného hřebenu.



*Obrázek 23 - Popis horní části efektoru*

Nevýhodou této varianty je velké množství pohonů a zajištění těsnosti před vnikem vody. Další nevýhodou je velké množství konstrukčních dílů.

Přednosti:

- Cena

Nevýhody:

- Složitost těsnění
- Přesnost polohování
- Počet pohonů
- Složitost konstrukce



## 6 Výběr optimální varianty

### 6.1 Hodnoty kritérií

Šestibodová stupnice hodnocení.

Úroveň kritéria	hodnota
Vysoká	6
Dobrá	5
Průměrná	4
Nízká	3
Nevyhovující	2
Nepříznivý stav	1

Tabulka 4 - Úrovně kritérií

### 6.2 Hodnotící kritéria

		Varianty řešení		
Označení kritéria	Kritérium	A	B	C
K1	Přesnost polohování	5	5	3
K2	Složitost utěsnění konstrukce	4	4	3
K3	Složitost konstrukce	5	6	3
K4	Složitost složení a rozložení	5	5	3
K5	Opotřebení čistícího prvku (kartáče, trysky)	3	5	3
K6	Cena	3	3	5

Tabulka 5 - Zhodnocení kritérií

#### Váha významnosti

Kde:

q – váha významnosti

$(v_i)_i$  – součet počtu voleb jednotlivými znalci

Vstupní hodnoty:

$$p = 5 [-]$$

$$q_1 = \frac{\sum (v_i)_i}{p}$$

$$q_1 = \frac{14}{5} = 2,8 [-] \quad (5.01)$$



## 6.4 Určení významnosti metodou porovnání trojúhelníku páru

Porovnávané páry kritérií					počet voleb
K1	K1	K1	K1	K1	3
K2	K3	K4	K5	K6	
	K2	K2	K2	K2	1,5
	K3	K4	K5	K6	
		K3	K3	K3	1,5
		K4	K5	K6	
		K4	K4		1
		K5	K6		
			K5		4
			K6		4

Tabulka 6 - Metoda trojúhelníků párů vypracovaná Martinem Ryšavým

Porovnávané páry kritérií					počet voleb
K1	K1	K1	K1	K1	1
K2	K3	K4	K5	K6	
	K2	K2	K2	K2	2
	K3	K4	K5	K6	
		K3	K3	K3	2,5
		K4	K5	K6	
		K4	K4		2
		K5	K6		
			K5		4,5
			K6		3

Tabulka 7 - Metoda trojúhelníků párů vypracovaná Pavlem Heiderem

Porovnávané páry kritérií					počet voleb
K1	K1	K1	K1	K1	3,5
K2	K3	K4	K5	K6	
	K2	K2	K2	K2	1
	K3	K4	K5	K6	
		K3	K3	K3	3
		K4	K5	K6	
		K4	K4		0,5
		K5	K6		
			K5		4
			K6		3

Tabulka 8 - Metoda trojúhelníků párů vypracovaná Petrem Pobuckým

Porovnávané páry kritérií					počet voleb
K1	K1	K1	K1	K1	3,5
K2	K3	K4	K5	K6	
	K2	K2	K2	K2	4,5
	K3	K4	K5	K6	
		K3	K3	K3	2,5
		K4	K5	K6	
			K4	K4	2
			K5	K6	
				K5	0
				K6	2,5

Tabulka 9 - Metoda trojúhelníků párů vypracována Markem Šostokem

Porovnávané páry kritérií					počet voleb
K1	K1	K1	K1	K1	3
K2	K3	K4	K5	K6	
	K2	K2	K2	K2	1
	K3	K4	K5	K6	
		K3	K3	K3	3
		K4	K5	K6	
			K4	K4	4
			K5	K6	
				K5	0
				K6	3,5

Tabulka 10 - Metoda trojúhelníků párů vypracována Alešem Vysockým

## 6.5 Určení váhy významnosti

Kritérium	Váha významnosti q
K1	2,8
K2	2
K3	2,5
K4	1,9
K5	2,5
K6	3,2

Tabulka 11 - Váha významnosti

## 6.6 Hodnocení jednotlivých variant

Varianta A			
Kritérium	Počet bodů	Váha významnosti kritéria	Vážený index kritéria
K1	5	2,8	14
K2	4	2	8
K3	5	2,5	12,5
K4	5	1,9	9,5
K5	3	2,5	7,5
K6	3	3,2	9,6
Suma vážených indexů varianty A			61,1

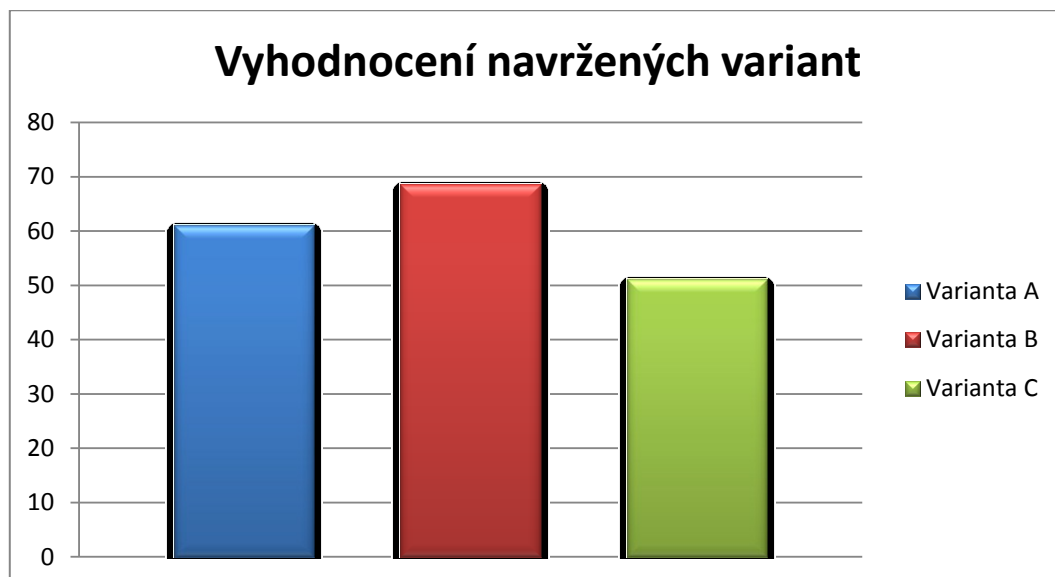
Tabulka 12 – Vyhodnocení varianty A

Varianta B			
Kritérium	Počet bodů	Váha významnosti kritéria	Vážený index kritéria
K1	5	2,8	14
K2	4	2	8
K3	6	2,5	15
K4	5	1,9	9,5
K5	5	2,5	12,5
K6	3	3,2	9,6
Suma vážených indexů varianty B			68,6

Tabulka 13 – Vyhodnocení varianty B

Varianta C			
Kritérium	Počet bodů	Váha významnosti kritéria	Vážený index kritéria
K1	3	2,8	8,4
K2	3	2	6
K3	3	2,5	7,5
K4	3	1,9	5,7
K5	3	2,5	7,5
K6	5	3,2	16
Suma vážených indexů varianty C			51,1

Tabulka 14 – Vyhodnocení varianty C



*Obrázek 24 - Vyhodnocení navržených variant*

Varianta B nejlépe vyhovuje výsledkům hodnotové analýzy. Vybraná varianta má nejméně pohonů a je konstrukčně méně náročná než zbylé dvě varianty. Variantu B lze bez potíží rozmontovat a smontovat na potřebném místě. Nevýhodou je vyšší cena lineárních pohonů.

Nejméně vhodná je varianta C a to díky složitému konstrukčnímu řešení efektoru a složitému těsnění celého systému. Komplikované je řešení přívodů kabelů a tlakového vzduchu.

## 7 Vypracování vybrané varianty

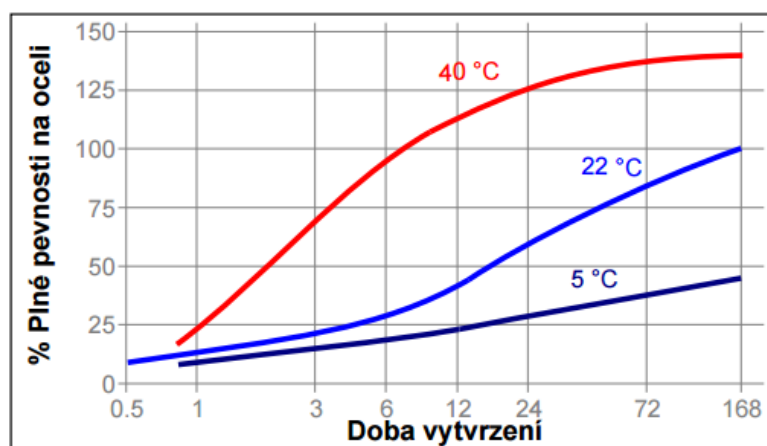
### 7.1 Laser

Měření je prováděno laserem, umístěným na spodním konci zařízení. Obal je navržen tak, aby dosedl na šikmou plochu clonky. Tím se zajistí jeho přesná poloha k měření clonky. Měřič máme k dispozici a je dostatečně přesný pro měření tolerancí H7. Pro správné měření celého obvodu díry je laserem otáčeno pohonem Maxon. Krouticí moment je přenášen třídílnou spojkou Oldham. Kvůli riziku poškození při manipulaci byl kladen požadavek na jeho zasunutí. To je provedeno lineárním pohonem Linak LA36. Při jeho návrhu bylo počítáno s přetlakem v komoře, což mnohonásobně zvyšuje jeho požadovanou sílu.

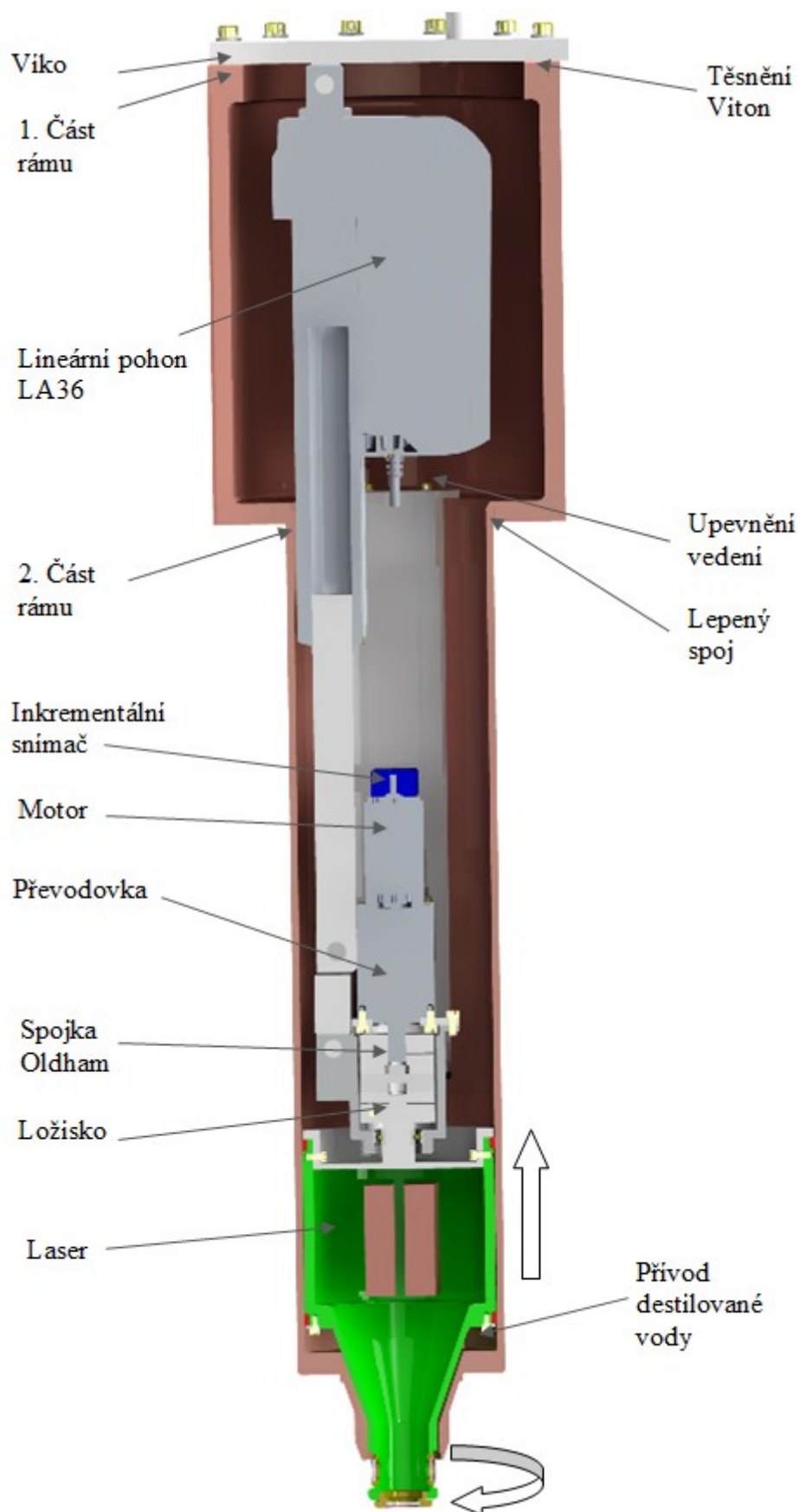
Nerezový obal zařízení je složen ze dvou částí, navzájem lepených. Tím je výrazně snížena cena výroby. Lepidlo Loctite 4090 disponuje vysokou odolností proti vodě a pevností. Pro dosažení maximální pevnosti je nutno nechat lepidlo vytvrdit na vzduchu. Při vystavení lepidla vodě se s časem snižuje jeho pevnost a dosahuje po 1 000 h 70 % původní pevnosti. Kontrola na smyk je uvedena příloze D. [21]

veličina	hodnota	jednotka
Pevnost ve smyku (nerezová ocel)	15	[MPa]
Pevnost ve smyku po 1 000 h ve vodě	70	[%]
Doba vytvrzení (22 °C)	168	[hod]

Tabulka 15 - Specifikace lepidla Loctite 4090 [21]



Obrázek 25 - Vytvrzení lepidla Loctite 4090 [21]



Obrázek 26 - Popis laserového měřiče

V celém zařízení je udržován stálý přetlak, který brání vniknutí okolní kapaliny do zařízení. Tento přetlak je počítán pro hloubku 6 m pod vodní hladinou s bezpečností 2 a je do zařízení přiváděn nerezovou hadicí Tinkair s jedním opletem, schopnou dopravovat plyny do tlaku 8 MPa. Těsnost závitového spoje hadice s konstrukcí je zajištěna lepidlem.

### **Výpočet hydrostatického tlaku v hloubce 6 m:**

**Kde:**

$\rho$  – hustota kapaliny

$p_0$  – atmosférický tlak

$g$  – gravitační zrychlení

$h$  – pracovní hloubka pod vodou

$p$  – tlak v hloubce 6 m

**Vstupní hodnoty:**

$$\rho = 1\,000 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$p_0 = 101\,325 \text{ [Pa]}$$

$$g = 9,81 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{]}$$

$$h = 6 \text{ [m]}$$

$$p = h \cdot \rho \cdot g + p_0$$

$$p = 6 \cdot 1\,000 \cdot 9,8 + 101\,325 = 160\,185 \text{ [Pa]} \quad (6.01)$$

### **Výpočet tlaku v zařízení**

Zařízení je nutno utěsnit z důvodu bezpečnosti a provozu drahé elektroniky.

**Kde:** $k$  – součinitel bezpečnosti**Vstupní hodnoty:**

$$k = 2$$

$$p_r = p \cdot k$$

$$p_r = 160\,185 \cdot 2 = 320\,370 \text{ [Pa]} \quad (6.02)$$

**Síla působící na válec v laseru**

Síla, kterou musí vyvinout lineární pohon.

**Kde:** $s_v$  – průřez válce $d_v$  – průměr válce $m_l$  – hmotnost laserového měřiče $a_v$  – zrychlení**Vstupní hodnoty:**

$$d_v = 0,13 \text{ [m]}$$

$$m_l = 3,05 \text{ [kg]}$$

$$F_{v1} = p_r \cdot S_v = p_r \cdot \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} + m_l \cdot (g + a_v)$$

$$F_{v1} = 320\,370 \cdot \frac{\pi \cdot 0,13^2}{4} + 3,05 \cdot (9,81 + 0,007)$$

$$\underline{F_{v1} = 4\,282,2 \text{ [N]}} \quad (6.03)$$

Dle vypočtených hodnot byl vybrán lineární pohon Linak LA36 s brzdou. Ta zaručuje blokaci v jakékoliv poloze. Pro zjednodušení konstrukce byl volen zdvih pohonu 200 mm. V praxi však bude využíván ke zdvihu 32 mm. Řízení je zajištěno jednotkou CB8-



2A (CB8 00 1 A 3 0 – 0 0), do které je přiváděn signál z průmyslového počítače (IPC).

Pohon je uchycen k víku pomocí nerezového čepu.

veličina	hodnota	jednotka
<b>Zdvih</b>	200	[mm]
<b>Maximální síla tah/tlak</b>	10 000	[N]
<b>Rychlost bez zatížení</b>	11	[mm.s <sup>-1</sup> ]
<b>Rychlost s max. zatížením</b>	7	[mm.s <sup>-1</sup> ]
<b>Proud min./max.</b>	2,4 – 10,4	[A]
<b>Napájení</b>	24	[V DC]



Tabulka 16 – základní specifikace pohonu LA 36 [22]      Obrázek 27 - Linak LA 36 [22]

Senzor Sick MPA – 107 odměřuje polohu laseru pomocí magnetického plátku, umístěného na horní straně příruby. Kvůli limitovanému prostoru je snímač přilepen na vedení.

veličina	hodnota	jednotka
<b>Měřený rozsah</b>	107	[mm]
<b>Napájení</b>	15 - 30	[V DC]
<b>Výstupní napětí</b>	0 - 10	[V DC]
<b>Výstupní proud</b>	4 - 20	[mA]
<b>Opakovatelná přesnost</b>	0,1	[mm]

Tabulka 17 [23]

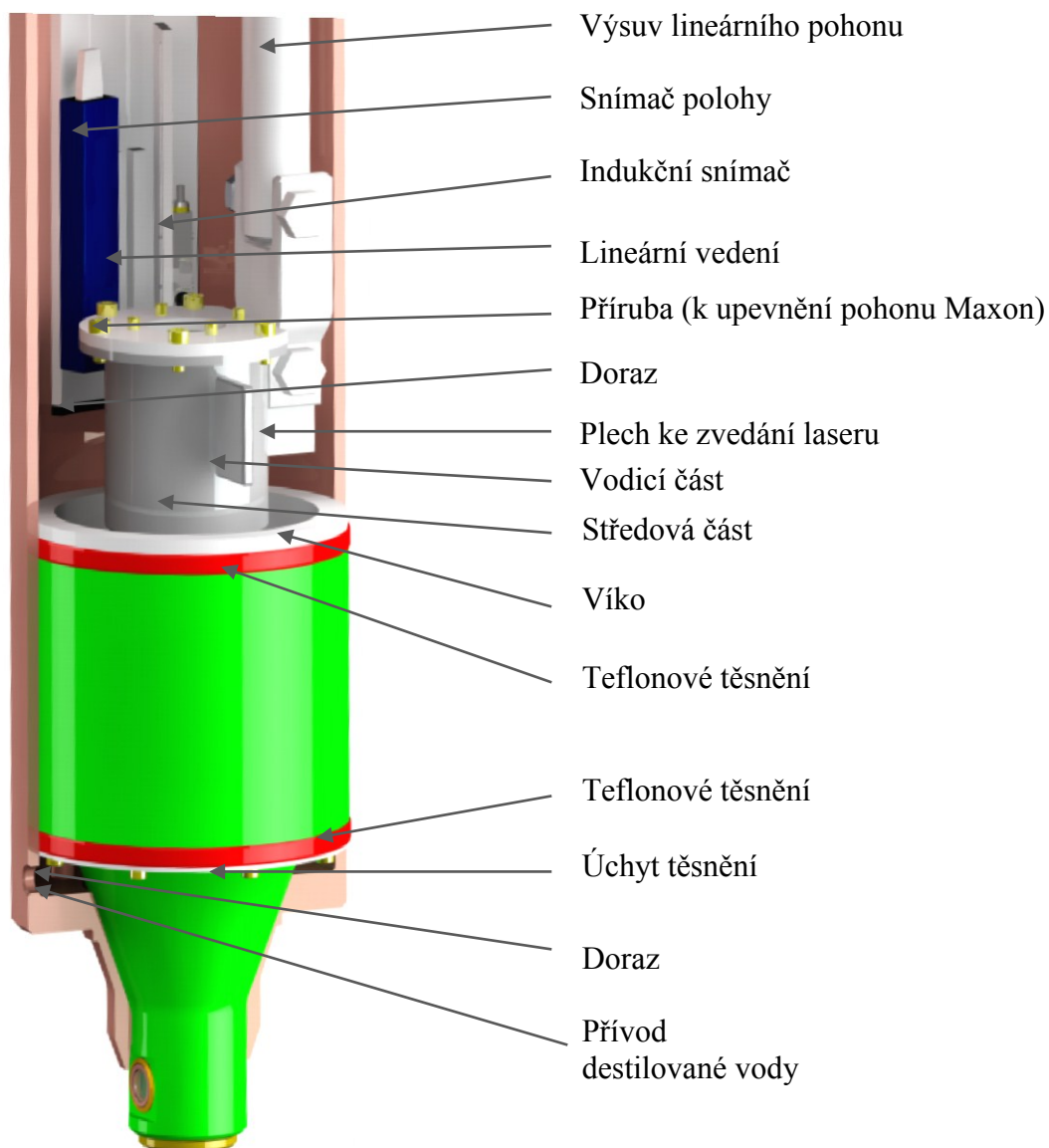


Obrázek 28 – Sick MPA 107 [23]

Indukční snímače jsou umístěny před koncovými polohami a umožňují řídicí jednotce zpomalit před dorazy. Balluff BES017P byly vybrány pro kompaktní rozměry a vhodné montážní provedení.

veličina	hodnota	jednotka
<b>Funkce výstupu</b>	NO (normal open)	[-]
<b>Provozní napětí</b>	10 - 30	[V]
<b>Spínací vzdálenost</b>	1.5	[mm]
<b>Výstupní proud</b>	4 - 12	[mA]

Tabulka 18 – Specifikace indukčního snímače [24]



Obrázek 29 - detail laseru (bez pohonu Maxon)

Kolem obalu laserového měřiče jsou umístěna dvě teflonová těsnění, zaručující dobrou těsnost a malé třecí odpory při pohybu. Spodní těsnění je uchyceno k měřiči plechem a šrouby. Horní těsnění je přichyceno víkem měřiče. Hrany těsnění jsou zkoseny pro lepší pohyblivost. Do spodní části je přiváděna destilovaná voda. Ta protéká kolem průzoru laserového měřiče a odvádí nečistoty. V této části jsou také umístěny dorazy se zakončením z Vitonu k zamezení posuvu laserového měřiče níže. Gumové dorazy pro horní lineární pohyb jsou přilepeny na spodní straně plechu na lineární vedení.

Otáčení měřiče je zajištěno pohonem Maxon s převodovkou. Otáčení měří enkodér, který je součástí pohonu. Specifikace jsou uvedeny v příloze A. Pohon dokáže vyvinout krouticí moment do 30 Nm. Pro tuto aplikaci dostačuje řídicí jednotka s rychlostním řízením. Vybrána byla řídicí jednotka Escon 50/5.

veličina	hodnota	jednotka
Počet otáček motoru	7500	[ot.min <sup>-1</sup> ]
Maximální vstupní otáčky převodovky	6 000	[ot.min <sup>-1</sup> ]
Krouticí moment převodovky	4 - 30	[Nm]
Převodový poměr	43 : 1	[-]
Účinnost převodovky	75	[%]
Výkon	150	[W]
Napětí	12	[V]
Proud	6	[A]
Hmotnost motoru	0.7	[kg]
Hmotnost převodovky	0.77	[kg]

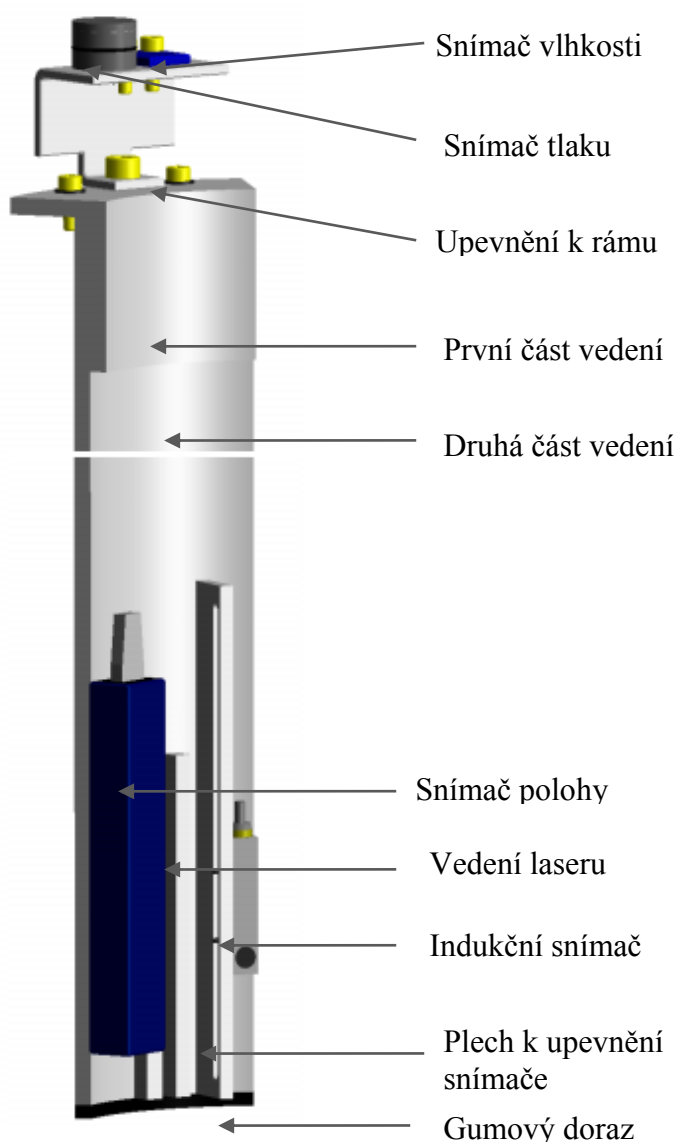
*Tabulka 19 - Základní specifikace pohonu Maxon v laserovém měřiči [25]*

K dosažení rotačního pohybu laseru slouží středová část. Ta umožňuje vedení vertikálního posuvného pohybu a zároveň brání otáčení pohonu Maxon. Vodicí část je ke středové přilepena lepidlem Loctite 4090. Stejným způsobem je přilepen plech, sloužící ke zvedání laseru. Spojení této části a výsuvu lineárního pohonu je zajištěno nerezovými čepy se závitovým zakončením a maticemi

Z maximálního momentu pohonu bylo vycházeno při volbě třídílné spojky Oldham OX50G – 12 se středem D50. Základní charakteristiky spojky jsou zobrazeny v tabulce č. 20. Spojka se vyznačuje jednoduchou montáží. Montáž do laserového měřiče umožňují otvory umístěné po bocích středové části.

veličina	hodnota	jednotka
Nominální moment	30	[Nm]
Kritický moment	95	[Nm]
Maximální průměr	50	[mm]
Vrtání středu	12	[mm]
Hmotnost	208	[g]

*Tabulka 20 – Specifikace spojky Oldham [26]*



Obrázek 30 – Vedení laseru

Vedení se skládá ze dvou částí vzájemně lepených lepidlem Loctite 4090. Spodní část je osazena gumovým dorazem a kovovými částmi sloužící pro vedení laserového měřiče a upevnění indukčních snímačů. Tyto kovové části jsou rovněž přilepeny. V horní části se nachází ohýbaný plech tloušťky 4 mm s umístěnými snímači vlhkosti a tlaku. Plech je připevněn šroubem k první části vedení.

Senzor tlaku 101B(a196) 60barS-I<sup>2</sup>C-0,25%fs-T1-316LSS-316L-4F-v byl zvolen pro své kompaktní rozměry a schopnost měření tlaku do 0,6 MPa. Připojení I<sup>2</sup>C sběrnicí.

veličina	hodnota	jednotka
<b>Maximální tlak</b>	0,6	[Mpa]
<b>Přetížení</b>	1,5	[Mpa]
<b>Přesnost</b>	$\leq \pm 0,25$	[%]
<b>Napájení</b>	5	[V DC]

Tabulka 21 – Specifikace senzoru tlaku [27]



Obrázek 31 - Senzor tlaku 101B (a196) [27]

Senzor vlhkosti Adafruit HTU21D-F je schopen měřit i teplotu. Datová komunikace probíhá přes I<sup>2</sup>C sběrnici a dále se převádí na USB.

veličina	hodnota	jednotka
Rozsah měřené teploty	-40 až +125	[°C]
Rozsah měřené vlhkosti	0 až 100	[%]
Napájení	1,5 – 3,6	[V DC]

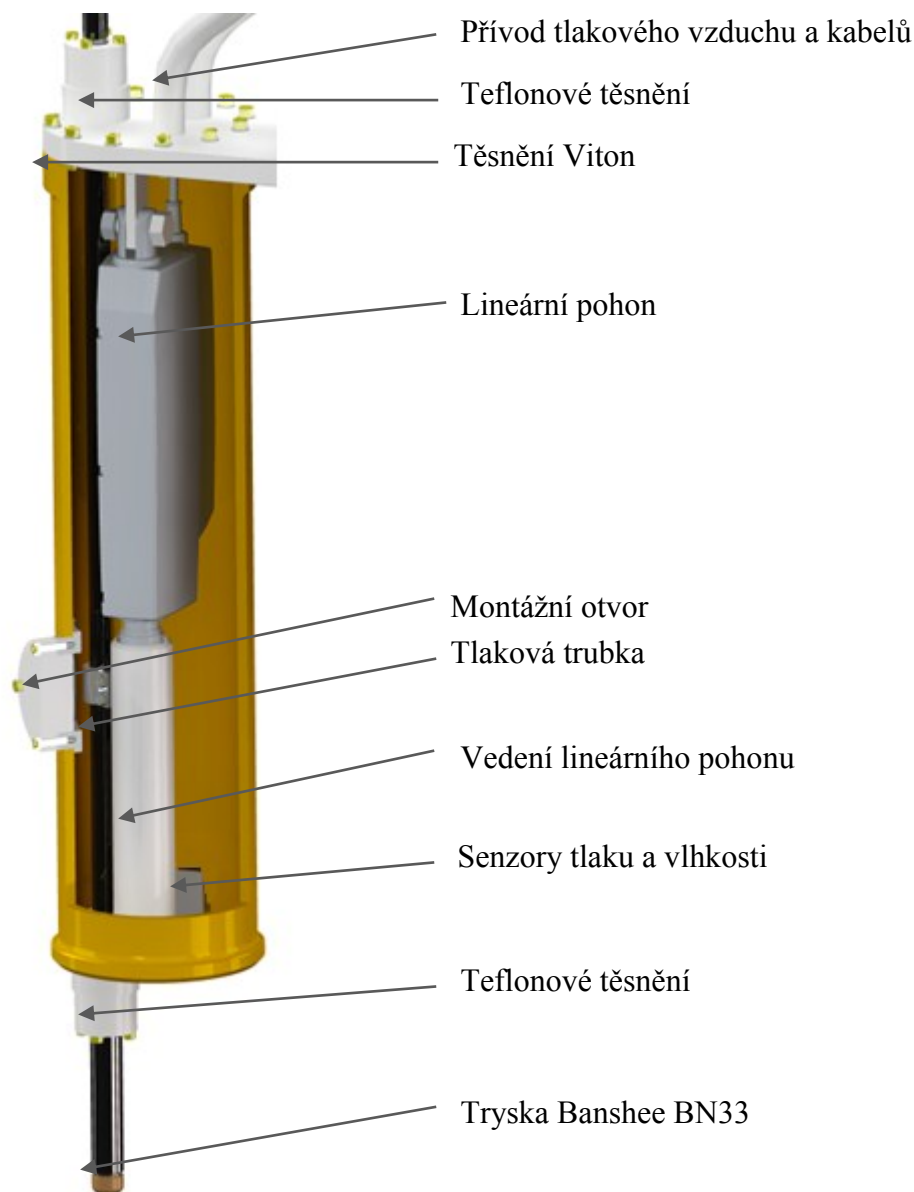
Tabulka 22 - základní vlastnosti senzoru SNS\_THE\_10m [28]



Obrázek 32 - Senzor vlhkosti [28]

## 7.2 Tryska

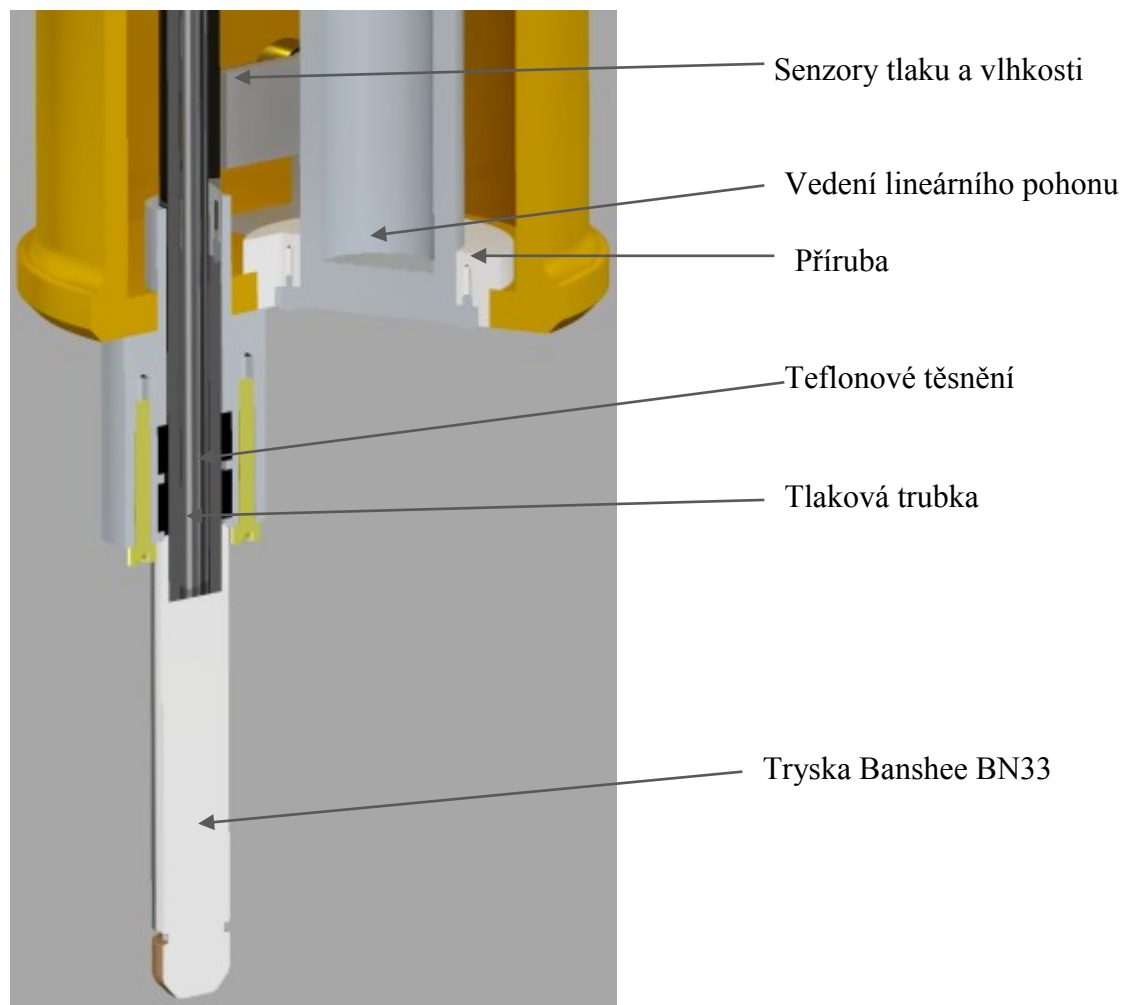
Pro čištění byla zvolena tryska Banshee BN33 s maximální výstupním tlakem 150 MPa. Přívodní trubka je vodná pro vedení tlaku do 137,8 MPa a je vybavena na obou koncích závitem. Lineární pohon vysouvá a zasouvá trysku. Spojení lineárního pohonu a tyče je provedeno svěrným spojem. Lineární pohon je uložen ve vedení, které brání prohnutí tlakové tyče.



*Tabulka 23 - Popis trysky*

Konec trysky se po přívodu tlakové vody automaticky otáčí. Tím je dosaženo čištění po celém po celém obvodu. Bylo zvoleno zakončení trysky „polisher 042“ jež disponuje dvěma výstupy na bocích, otočených po obvodu o 180°. Výstupy umožňují rozstřík vody v rozmezí od 85° do 105°. Jelikož je do trysky přiváděna vysokotlaká voda, dochází zde k opotřebení. Trysku je obvykle nutné vyměnit po 20 až 60 hodinách, podle čistoty vody. Výrobce doporučuje použití filtru s jemností 25  $\mu\text{m}$ . Těsnost zajišťují zdvojená teflonová těsnění ve spodní a horní části vyrobená na míru. Tato těsnění jsou uložena v nerezových pouzdrech sešroubovaných k sobě. Sešroubované pouzdro je pak přilepeno k rámu, čímž je dosaženo vhodné pevnosti i těsnosti spoje.

Spodní část obalu je osazena stejnými snímači, jako v případě laserového měřiče. Přívod tlakového vzduchu a vedení kabelů je vyvedeno přes víko, ve kterém jsou vyvrtány závity. Těsnost v závitu je pojištěna lepidlem Loctite 2400.



Obrázek 33 - Detail trysky

Všechny součásti přicházející do styku s vodou jsou v nerezovém provedení.

Lineární pohon LA 12 (12 X S 02 – 2 130 24 2 8) je napájen stejnosměrným napětím 24 V a je schopen vyvinout sílu až 300 N. Kvůli schopnosti samoblokace do 150 N v tahu není potřeba používat pohon s brzdou. Měření polohy je zajištěno Halloovou sondou. Pohon je řízen řídicí jednotkou na kterou se dále napojí výstupy z IPC který pohon řídí. Jednotka CB8-2A (CB8 00 1 A 3 0 – 0 0) je napájena ze sítě.

veličina	hodnota	jednotka
Maximální síla tah/tlak	300	[N]
zdvih	130	[mm]
Samoblokace v tahu	150	[N]
Samoblokace v tlaku	300	[N]
Rychlost bez zatížení	27	[mm.s <sup>-1</sup> ]
Rychlost s max. zatížením	16	[mm.s <sup>-1</sup> ]
Napájení	24	[V DC]

Tabulka 24 – Specifikace pohonu LA12 [30]



Obrázek 34 –lineární pohon LA12 [29]

veličina	hodnota	jednotka
Výstupní napájení	24	[V DC]
Napájení	230	[V AC]
Kapacita baterie	2.9	[Ah]

Tabulka 25 – specifikace řídicí jednotky LA12 [30]

### 7.3 Rotace efektoru

Obal laserového měřiče a trysky jsou upevněny šrouby k desce. Pohon Maxon touto částí otáčí. Tím je manipulátor schopen dosáhnout většího pracovního prostoru. Osa otáčení je ve středu mezi pracovními nástroji, takže při otočení není nutno polohu jinak upravovat dalšími pohony.

#### Výpočet středového rotačního pohonu

##### Odpor prostředí proti pohybu laseru

Odpor prostředí je dán součtem odporu laseru a trysky. Okamžitá rychlost je dána předpokládanou rychlostí otáčení 0,25 ot.s<sup>-1</sup>.



**Kde:**

$C_o$  – součinitel odporu pro kruhový tvar tělesa

$S_l$  – průřez obalu laserového měřiče

$v_l$  – rychlost laserového měřiče

**Vstupní hodnoty:**

$$C_o = 0,48 [-]$$

$$S_l = 0,1618 [m^2]$$

$$v_l = 0,308 [m.s^{-1}]$$

$$r_1 = 0,196 [m]$$

$$M_{ol} = \left( \frac{1}{2} \cdot C_o \cdot \rho \cdot S_l \cdot v_l^2 \right) \cdot r_1$$

$$M_{ol} = \left( \frac{1}{2} \cdot 0,48 \cdot 1000 \cdot 0,1618 \cdot 0,308^2 \right) \cdot 0,196 = 0,722 [Nm] \quad (6.04)$$

**Odpor prostředí proti pohybu trysky****Kde:**

$S_t$  – průřez obalu trysky

$v_t$  – rychlost trysky

Vstupní hodnoty:

$$S_t = 0,05832 [m^2]$$

$$v_t = 0,258 [m.s^{-1}]$$

$$r_2 = 0,164 [m]$$

$$M_{ot} = \left( \frac{1}{2} \cdot C_o \cdot \rho \cdot S_t \cdot v_t^2 \right) \cdot r_2$$

$$M_{ot} = \left( \frac{1}{2} \cdot 0,48 \cdot 1000 \cdot 0,05832 \cdot 0,258^2 \right) \cdot 0,164 = 0,154 [Nm] \quad (6.05)$$

**Výpočet minimálního momentu středového pohonu:****Kde:**

$M_{d1}$  - minimální výstupní moment pohonu bez odporů prostředí

$\omega$  – úhlová rychlost

$d_0$  – celková dráha

$m_{ef}$  – hmotnost efektoru

$r$  – vzdálenost těžiště od osy rotace

$k_1$  – koeficient rozběhu

$k_2$  - koeficient provedení konstrukce

Vstupní hodnoty:

$$\omega = 1,57 \text{ [rad.s}^{-1}\text{]}$$

$$d_0 = \pi \text{ [rad]}$$

$$m_{ef} = 79,5 \text{ [kg]}$$

$$r = 0,0943 \text{ [m]}$$

$$k_1 = 0,2$$

$$k_2 = 4$$

$$M_{d1} = k_2 \cdot m_{ef} \cdot r^2 \cdot \frac{\omega^2}{2 \cdot k_1 \cdot d_0}$$

$$M_{d1} = 4.79,5 \cdot 0,0943^2 \cdot \frac{1,57^2}{2 \cdot 0,2 \cdot 3,14} = 11,1 \text{ [N.m]} \quad (6.06)$$

**Výpočet momentu pohonu s odporem prostředí****Kde:** $M_{c1}$  – minimální výstupní moment pohonu s podpory prostředí

$$M_{c1} = M_{d1} + M_{ot} + M_{ol}$$

$$M_{c1} = 11,1 + 0,154 + 0,722 = 11,98 \text{ [N.m]} \quad (6.07)$$

Z vypočtených hodnot byl zvolen pohon Maxon, který je vybaven brzdou i enkodérem a je schopen vyvinout sílu až 30 Nm. Přesné řízení polohy je zajištěno jednotkou Epos 2 50/5.

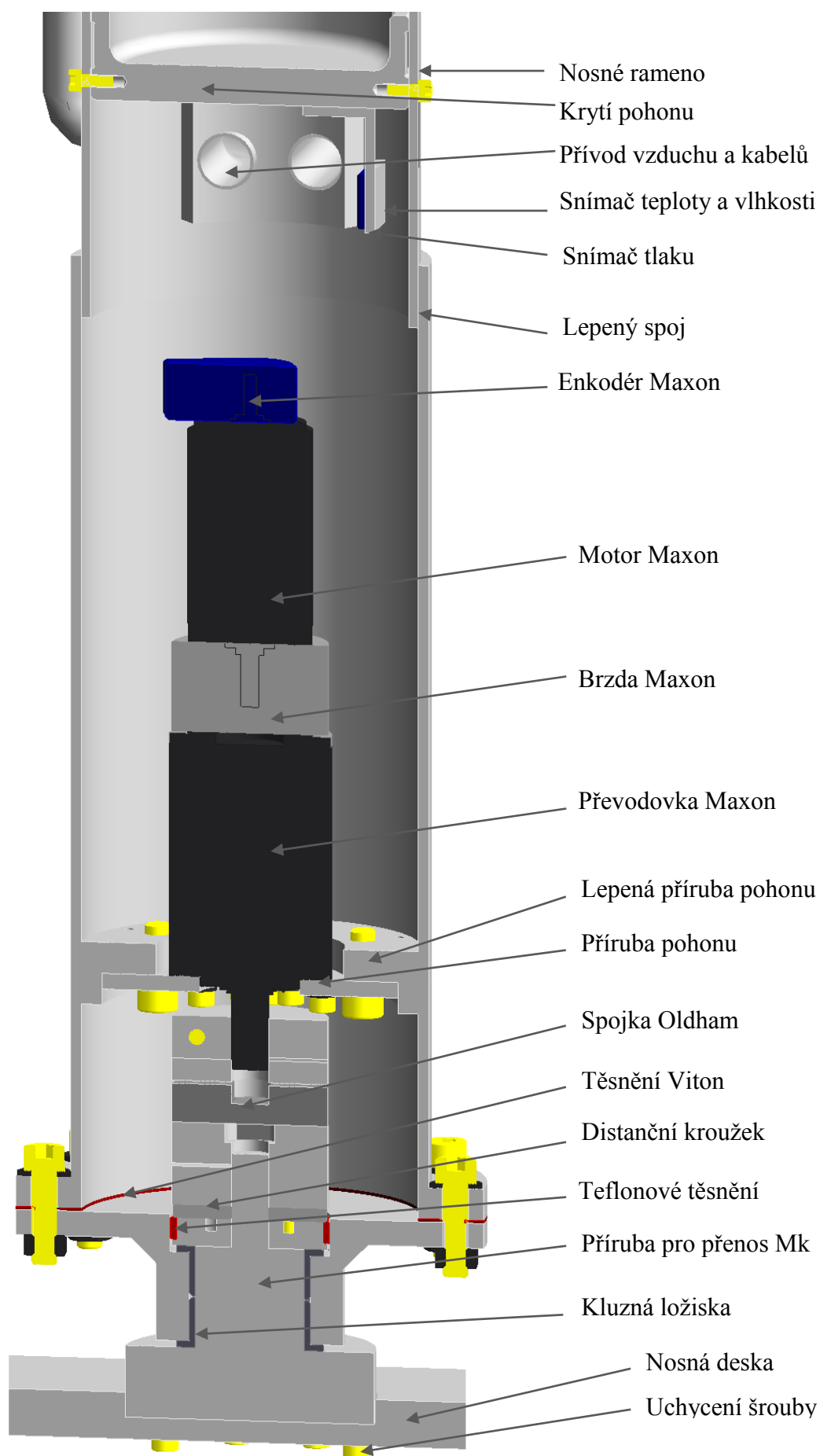
Krouticí moment z pohonu je přenášen třídílnou spojkou Oldham a opačně orientovanými kluznými ložisky Igus XFM-3539-26 vhodnými do vlhkého prostředí s velkou odolností proti opotřebení. Použita je stejná spojka jako pohonu laseru - OX50G – 12 se středem D50.

veličina	hodnota	jednotka
Průměr hřídele	35	[mm]
Šířka ložiska	26	[mm]
Provozní teplota	- 100 až 250	[°C]
Dovolený tlak	150	[MPa]

*Tabulka 26 – Specifikace kluzného ložiska*

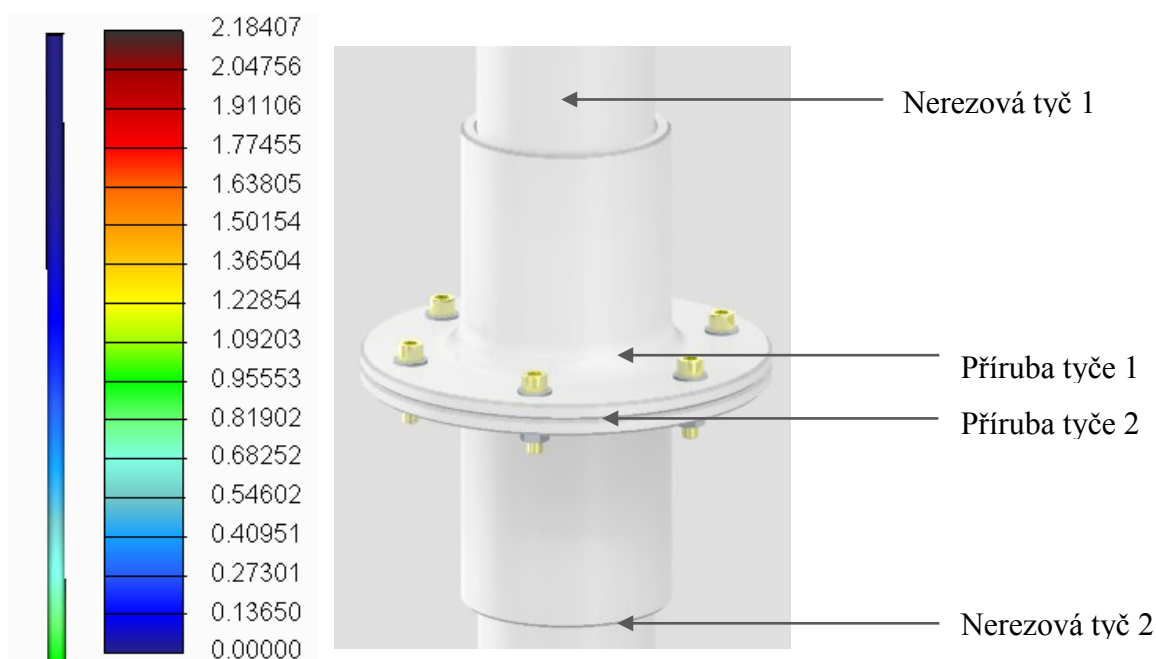


*Obrázek 35 - Kluzné ložisko[36]*

*Obrázek 36 – Otáčení efektoru*

Teflonové těsnění je vyrobené na zakázku a ze spodní strany se opírá o přírubu. Z horní strany je jištěné distančním kroužkem a spojkou Oldham, upevněnou svěrným spojem. Krytí pohonu umožňuje udržení přetlaku jen v nezbytně nutném prostoru. Tlakový vzduch a kabely jsou přiváděny bokem nosné trubky, ke které je přilepena kovová část se závity. Závit se při montáži pojišťuje lepidlem. Senzory jsou voleny stejné jako u laserového měřiče či trysky.

Nosné rameno je vyrobeno z nerezové oceli a je rozděleno na dvě části, kvůli snadnému transportu a jednoduché montáži. Obě části jsou zakončeny záslepkami, které zaručují těsnost. Záslepky jsou lepeny lepidlem Loctite 4090.



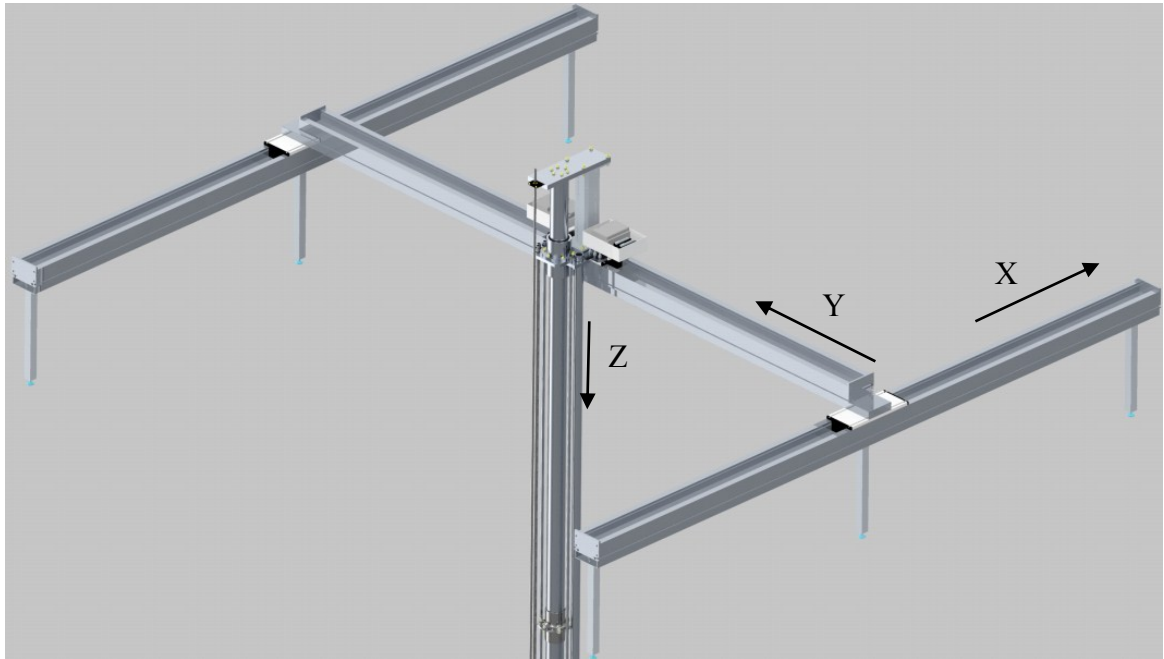
Obrázek 37 - Spoj trubek

Rameno o průměru 108 mm a tloušťce stěny 3 mm bylo analyzováno na ohyb. Do simulace byly započítány odpory působící na rameno při pohybu vodou a odpory zrychlením. Z analýzy vyplývá, že při rychlosti  $100 \text{ mm.s}^{-1}$  a zrychlení  $50 \text{ mm.s}^{-2}$  je konec ramena vychýlen o 2,18 mm.

Obrázek 38 -  
deformace trubky

## 7.4 Konstrukce nad vodou

Konstrukci nad vodou tvoří čtyři lineární pohony. Tři zajišťují polohu v ose „x“ a „y“.



Obrázek 39 - Konstrukce manipulátoru

Lineární sloup zajišťuje zvedání ramena a tedy i efektoru v ose „z“

### Výpočet tíhové síly působící na polohovací sloup

Výslednici této síly musí zachytit polohovací sloup umístěný nad hladinou. Tíhová síla je dána součtem všech hmotností konstrukce spolu s přívody kabelů a energií.

**Kde:**

$F_g$  – tíhová síla ramena

$m_e$  – hmotnost efektoru, nosného ramena a přívodů

**Vstupní hodnoty:**

$$m_e = 168,3 \text{ [kg]}$$

$$F_g = m_e \cdot g$$

$$F_g = 168,3 \cdot 9,81 = 1651 \text{ [N]} \quad (6.08)$$

**Vztlaková síla působící rameno****Kde:** $F_{vz}$  – vztlaková síla $V_e$  – objem efektoru, nosného ramena a přívodů pod vodou**Vstupní hodnoty:**

$$V_e = 0,09728 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$F_{vz} = V_e \cdot \rho \cdot g$$

$$F_{vz} = 0,09728 \cdot 1\,000 \cdot 9,81 = 945,31 \text{ [N]} \quad (6.09)$$

**Výslednice sil působících na rameno****Kde:** $F_v$  – výsledná síla působící na rameno

$$F_v = F_g - F_{vz}$$

$$F_v = 1651 - 945,31 = 705,69 \text{ [N]} \quad (6.10)$$

**Moment působící na lineární pohon č. 2. a středový lineární pohon****Kde:** $l_1$  – rameno $M_p$  – moment vyvolaný 6m ramenem, efektozem a přívody**Vstupní hodnoty:**

$$l_1 = 0,2215 \text{ [m]}$$

$$M_p = F_v \cdot l_1$$

$$M_p = 705,69 \cdot 0,2215 = 156,31 \text{ [Nm]} \quad (6.11)$$

Vypočteným hodnotám vyhovuje pohon firmy Linak LP25 B B G 250. Výhodou lineárního sloupku je možnost zatížení momentem a jednoduchost ovládání. Zdvih sloupku je výrazně vyšší, než je potřeba pro čištění a to zejména z důvodu bezpečnosti při montáži a snížení dovoleného momentu při větším vysunutí. Pohon je řízen řídicí jednotkou, která je napojená výstupy z IPC, který pohon řídí. Jednotka CB8-2A (CB8 00 1 A 3 0 – 0 0) je napájena ze sítě.

veličina	hodnota	jednotka
<b>Zdvih</b>	250	[mm]
<b>Maximální síla tlak</b>	1 600	[N]
<b>Maximální moment osa x</b>	1 600	[Nm]
<b>Maximální moment osa y</b>	1 000	[Nm]
<b>Rychlost bez zatížení</b>	21	[mm.s <sup>-1</sup> ]
<b>Rychlost s max. zatížením</b>	13	[mm.s <sup>-1</sup> ]
<b>Proud min./max.</b>	1,6 – 4,4	[A]
<b>Napájení</b>	24	[V DC]

Tabulka 27 - Linak LP25 [30]

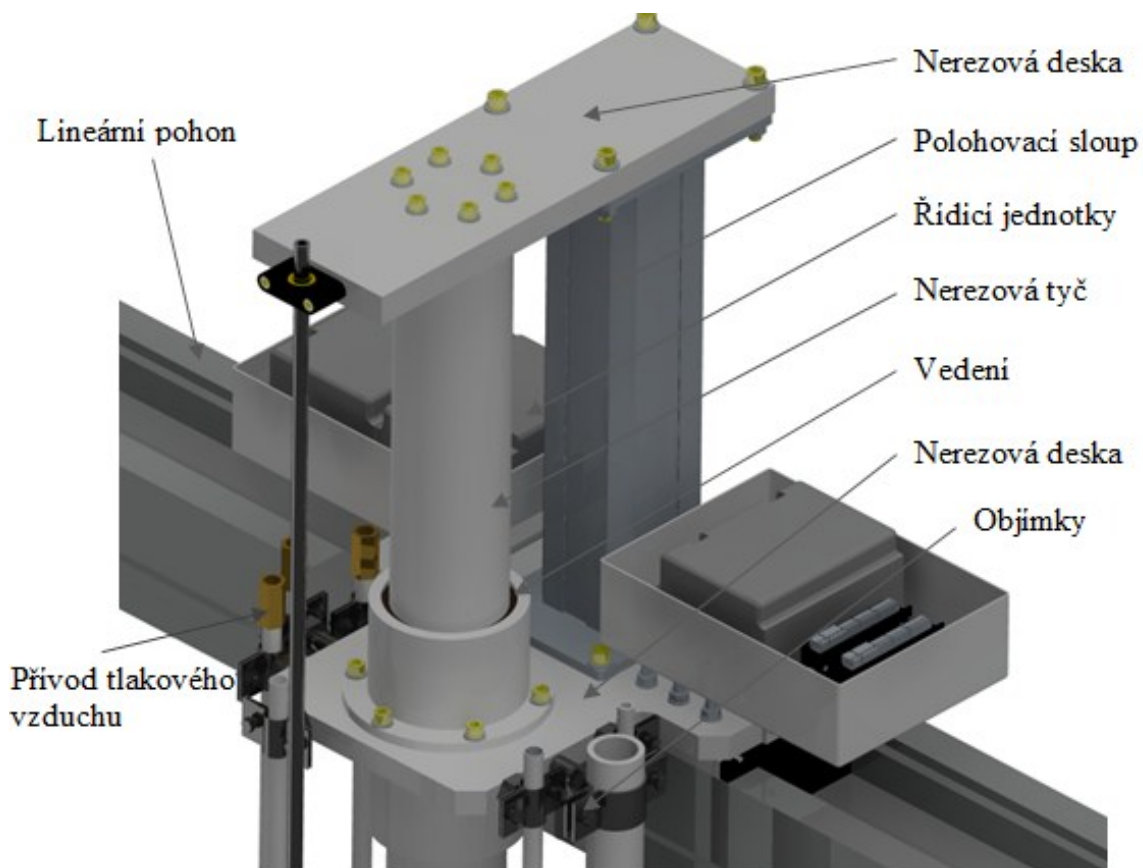


Vedení ramena se skládá z rámu a kluzných ložisek, která zaručují nízké tření při posuvu a omezují vychýlení ramene při pohybu. Přívod tlakové vody je uložen ve stojatém ložisku.

Ložisko lze natočit což umožňuje volně otáčet *Obrázek 40 - Linak LP25 [30]* efektoem v rozsahu  $\pm 90^\circ$ . Veškeré přívody

tlakového vzduchu, kabelů i destilované vody jsou vyvedeny k nerezové desce. Ta má po bocích vyvrtané závitové otvory pro umístění objímek, které dokáží zachytit sílu v axiálním směru až 1 000 N, což plně dostačuje. Deska je připevněna k vozíku lineárního motoru šrouby. K této desce je také připevněn polohovací sloupek a boxy na řídicí jednotky. Řídicí jednotky jsou umístěny co nejblíže pohonů k dosažení co nejmenší vzdálenosti a omezení rušení. Boxy jsou vyrobeny na míru, a jsou v nich umístěny dvě řídicí jednotky Maxon a tři řídicí jednotky lineárních pohonů Linak.





Obrázek 41 - Střední část s polohovacím sloupem

### Výpočet síly středového lineárního motoru

**Kde:**

$m_{\text{str}}$  – hmotnost středové části

$a_c$  – zrychlení středové části

$v_c$  – rychlost středové části

$S_{\text{str}}$  – plocha odporu středové části

$F_{\text{str}}$  – odpor proti pohybu středové části

**Vstupní hodnoty:**

$m_{\text{str}} = 192,34 \text{ [kg]}$

$a_c = 0,05 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$

$v_c = 0.1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$

$$S_{\text{str}} = 0,792 \text{ [m}^2\text{]}$$

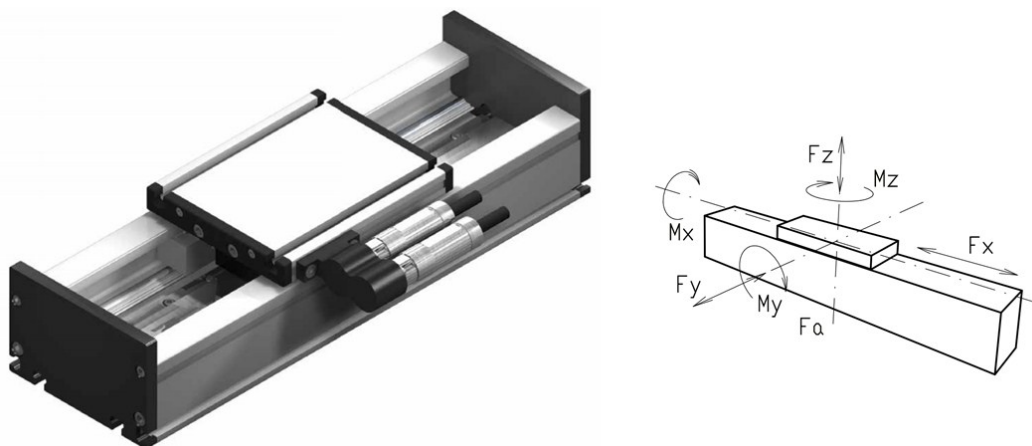
$$F_{\text{str}} = m_{\text{str}} \cdot a_{\text{str}} + \frac{1}{2} \cdot C_o \cdot \rho \cdot S_{\text{str}} \cdot v_{\text{str}}^2$$

$$F_{\text{str}} = 192,34 \cdot 0,05 + \frac{1}{2} \cdot 0,48 \cdot 1000 \cdot 0,792 \cdot 0,1^2 = 11,518 \text{ N} \quad (6.12)$$

Středový lineární pohon Raveo DLM 200 0 3 1 1 2 byl volen pro svou vysokou opakovatelnou přesnost, kompaktnost a vysokou únosnost. Polohu měří zabudovaný snímač s přesností 0,05 mm. Pohon funguje na bázi synchronního motoru. Omezení průhybu je zajištěno hliníkovým profilem, připevněným šrouby. Vedení kabelů k pohonu je zajištěno po boku motoru, a bude se využívat i pro vedení kabeláže ostatních součástí, umístěných na vozíku. Při maximálním dovoleném zatížení ve středu udává výrobce průhyb až 8 mm. Tento průhyb výrazně omezuje hliníkový profil, umístěný pod motorem.

veličina	hodnota	jednotka
<b>Opakovatelná přesnost</b>	±0.1	[mm]
<b>Maximální zatížení</b>	2 000	[N]
<b>F<sub>x</sub></b>	574	[N]
<b>F<sub>x</sub> max. (1s)</b>	1 301	[N]
<b>M<sub>x</sub></b>	400	[Nm]
<b>M<sub>y</sub></b>	420	[Nm]
<b>M<sub>z</sub></b>	170	[Nm]
<b>Délka</b>	4 470	[mm]

Tabulka 28 - Specifikace lineárního pohonu DLM 200 0 3 1 1 2



Obrázek 42 – Pohon Raveo a působící síly

Řídicí jednotka ECOVARIO® 414 pohonu je umístěna vně zařízení. Výhodou je schopnost momentového řízení. Jednotka dále disponuje dvěma přípojkami pro enkodéry, USB portem i ethernetovým interfacem.

veličina	hodnota	jednotka
Napájecí napětí	230	[V AC]
Výstupní napětí	205	[V AC]
Výstupní proud	7.1	[A]

Tabulka 29 - Specifikace řídicí jednotky ECOVARIO® 414



Obrázek 43 - Řídicí jednotka ECOVARIO® 414

Boční lineární pohony jsou voleny stejné jako středový, pouze s odlišnou velikostí vozíku, který má větší únosnost. Zvoleny byly pohony

Raveo DLM 200 0 3 1 1 3. Všechny pohony Raveo využívají jednu řídicí jednotku ECOVARIO® 414. Při použití obou bočních pohonů zároveň dochází k vytváření elektromotorického napětí. To bude odváděno schunt regulátorem.

veličina	hodnota	jednotka
Opakovatelná přesnost	$\pm 0.1$	[mm]
Maximální zatížení	2 800	[N]
F <sub>x</sub>	766	[N]
F <sub>x</sub> max. (1s)	1 735	[N]
M <sub>x</sub>	220	[Nm]
M <sub>y</sub>	230	[Nm]
M <sub>z</sub>	210	[Nm]
Délka	4 470	[mm]

Tabulka 30 - Specifikace lineárního pohonu DLM 200 0 3 1 1 3.

Všechny lineární motory jsou podepřeny hliníkovými profily, které omezují průhyb. Spojení profilu a motoru je provedeno šrouby a po prvním smontování je už nebude potřeba rozmontovávat. Hliníkové profily jsou postaveny na profilech firmy Bosch řady 10, 50 x 50 mm. Konce nohou jsou vybaveny rektifikačními šrouby pro vyrovnání mírných nerovností podlahy a dosažení co největší stability.

## 7.5 Vedení kabelů, přívodních kapalin a plynů a kabelů

Kabeláž a tlakový vzduch je přiváděn nerezovými hadicemi Tinkair. Všechny hadice jsou připojovány k součástem pomocí DIN závitů a vyvedeny nad vodu, kde jsou

k dispozici k připojení. Hadice je nutno spojit ze dvou částí spojku. K pojištění závitového spoje je použito lepidlo Loctite 2400. Úniku tlakového vzduchu přes hadici vedoucí kabely je zamezeno těsnicí směsí MS Unifix, která dokáže utěsnit malé otvory do průměru 20 mm [33]. U větších průměru bude k lepení použita guma spolu s tímto tmelem.



Obrázek 44 - Nerezová hadice Tinkair s opletem [31]

Průměr hadic pro vedení kabelů byl volen s ohledem na počet kabelů a jejich průměr pro každou konstrukční část zvlášť. Před provlečením kabelů se počítá s odstraněním koncovek a jejich opětovné montáži po provlečení.

veličina	vnitřní průměr	dovolený tlak
Laserová jednotka	40	4.6
Tryska	20	7
Otáčení efektozem	25	6
	[mm]	[MPa]

Tabulka 31 – Specifikace hadic Tinkair pro vedení kabelů [31]

Tlakový vzduch je přiváděn nerezovou hadicí do každé části zvlášť. V horní části nad vodou jsou všechny tyto hadice vyvedeny a připraveny na připojení tlakového vzduchu z externího zdroje. Tento zdroj musí být schopen regulovat přívodní tlak v závislosti na naměřených hodnotách ze snímačů. Musí se také počítat s časovou prodlevou dopravy tlakového vzduchu.

veličina	hodnota	jednotka
vnitřní průměr	16	[mm]
dovolený tlak	8	[Mpa]

Tabulka 32 – Specifikace přívodů tlakových hadic Tinkair [31]

Do spodní části laserového měřiče je přiváděna destilovaná voda, kvůli čištění průzoru clonky. Přiváděná musí mít větší tlak, než se vyskytuje v této hloubce

veličina	hodnota	jednotka
vnitřní průměr	12	[mm]
dovolený tlak	8.7	[MPa]

Tabulka 33 – Specifikace přívodu destilované vody [31]

Pro vedení vody do trysky byla vybrána tlaková trubka délky 7 m, vhodná pro vedení tlaku do 103,4 MPa se závitovými zakončeními pro připojení trysky [32]. Reálný čistící tlak i průtok musí být odzkoušen v praxi.

## 7.6 Přívody energií

V aplikaci se počítá, že připojení k požadovaným energiím bude k dispozici v místě čištění tepelného výměníku. Přiváděný tlakový vzduch musí být bez vlhkosti kvůli ochraně a delší životnosti zařízení. Z toho důvodu musí být zajištěn zdroj suchého tlakového vzduchu, nebo musí být před aplikací vysušen. Tlakový vzduch je na výstupu regulovatelný k dosažení potřebného tlaku v zařízení. Pro správnou funkci zařízení jsou potřeba tyto přívody:

- přívod tlakového vzduchu
- přívod tlakové vody
- přívod destilované vody

	tlak	jednotka
tlakový vzduch	0,4	[MPa]
destilovaná voda	0,2	[MPa]
Tlaková voda	30	[MPa]

Tabulka 34 - Požadavky na přívodní energie

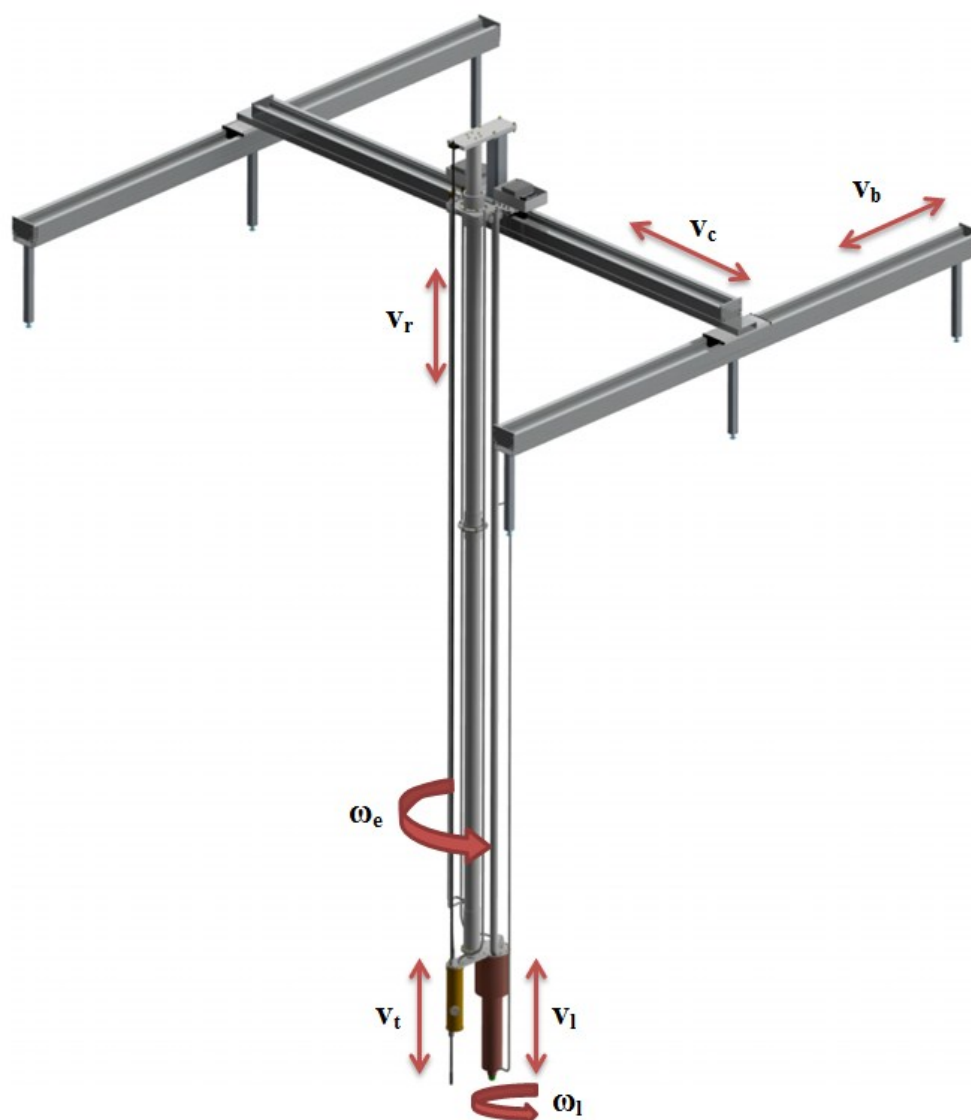
- přívod elektrické energie

	Napájení		Proud
Pohony Maxon	12	DC	6
Linak LA36	24	DC	2,4 – 10,4
Linak LA12	24	DC	0,5 – 2,5
Linak LP25	24	DC	1,6 – 4,4
Raveo – Středový pohon	205	AC	5,3
Raveo - Boční pohony	205	AC	5,3
Řídicí jednotka Epos 2	230	AC	
Řídicí jednotka Escon	230	AC	
Řídicí jednotka ECOVARIO (3x)	230	AC	
Jednotka	[V]		[A]

Tabulka 35 - Napájení

## 7.7 Pohyb jednotlivých částí

Na obrázku č. 43 jsou zobrazeny základní pohyby manipulátoru.

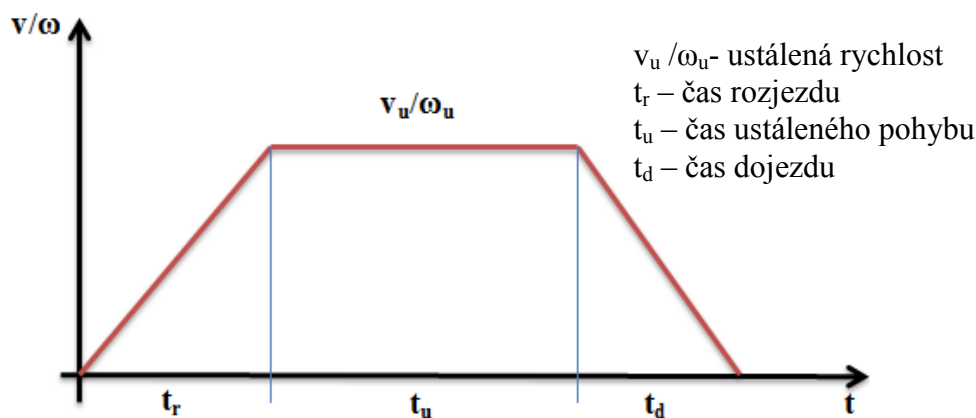


Obrázek 45 - Znázornění pohybů manipulátoru

Název	Označení	Rychlost	Zrychlení	Rozsah pohybu
Laser	$v_l$	7 [mm.s <sup>-1</sup> ]	7 [mm.s <sup>-2</sup> ]	32 [mm]
Laser	$\omega_t$	7,5 [ot.min <sup>-1</sup> ]	5 [ot.s <sup>-2</sup> ]	360 [°]
Tryska	$v_t$	16 [mm.s <sup>-1</sup> ]	16 [mm.s <sup>-2</sup> ]	130 [mm]
Efektor	$\omega_e$	0,25 [ot.s <sup>-1</sup> ]	0,5 [ot.s <sup>-2</sup> ]	180 [°]
Rameno	$v_r$	13 [mm.s <sup>-1</sup> ]	6,5 [mm.s <sup>-2</sup> ]	60 [mm]
Středový pohon	$v_c$	100 [mm.s <sup>-1</sup> ]	50 [mm.s <sup>-2</sup> ]	4 010 [mm]
Boční pohony	$v_b$	100 [mm.s <sup>-1</sup> ]	50 [mm.s <sup>-2</sup> ]	4 010 [mm]

Tabulka 36 - Základní parametry manipulátoru

Pohyb je realizován lichoběžníkovým průběhem. Hodnoty v tabulce č. 36 jsou zvoleny v závislosti na možnostech jednotlivých pohonů s ohledem na odpor vody proti pohybu a s tím spojené nežádoucí ohyby ramena. Čas měření byl stanoven s ohledem na přesnost měření vnitřního rozměru clonky na 8 s. Přesný čas, potřebný na čištění clonky je nutno dále nutno ověřit v praxi.



Obrázek 46 - Lichoběžníkový průběh pohybu

Cyklus čištění se skládá z následujících kroků:

1. Zajetí efektoru na doraz do clonky
2. Vysunutí laserového měřiče
3. Měření laserového měřiče  $360^\circ$
4. Zasunutí laserového měřiče
5. Vysunutí efektoru
6. Otočení efektoru o  $180^\circ$
7. Zajetí trysky do čisticí polohy
8. Čištění clonky
9. Vyjetí trysky
10. Otočení efektoru o  $180^\circ$
11. Zajetí efektoru na doraz clonky
12. Vysunutí laserového měřiče
13. Měření laserového měřiče  $360^\circ$
14. Zasunutí laserového měřiče
15. Vysunutí efektoru
16. Přejezd ramena nad další clonku

**Výpočet času zajetí efektoru na doraz do clonky**

Čas zajetí i vyjetí efektoru je stejný.

**Kde:**

$v_r$  – rychlost zdvihu sloupku

$a_r$  – zrychlení sloupku

$s_{ru}$  – dráha sloupku při ustálené rychlosti

$t_{cr}$  – celkový čas vyjetí efektoru

**Vstupní hodnoty:**

$$v_r = 13 \text{ [mm.s}^{-1}\text{]}$$

$$a_r = 7 \text{ [mm.s}^{-2}\text{]}$$

$$s_{ru} = 53 \text{ [mm]}$$

$$t_{cr} = 2 \cdot \frac{v_r}{a_r} + \frac{s_{ru}}{v_r}$$

$$t_{cr} = 2 \cdot \frac{13}{6,5} + \frac{53}{13} = 8 \text{ [s]} \quad (6.13)$$

**Výpočet času vysunutí laserového měřiče**

Čas vysunutí a zasunutí laserového měřiče je stejný.

**Kde:**

$v_l$  – rychlost zdvihu laseru

$a_l$  – zrychlení laseru

$s_{lu}$  – dráha laseru při ustálené rychlosti

$t_{cl}$  – celkový čas



**Vstupní hodnoty:**

$$v_l = 7 \text{ [mm.s}^{-1}\text{]}$$

$$a_l = 7 \text{ [mm.s}^{-2}\text{]}$$

$$s_{lu} = 26 \text{ [mm]}$$

$$t_{cl} = 2 \cdot \frac{v_l}{a_l} + \frac{s_{lu}}{v_l}$$

$$t_{cl} = 2 \cdot \frac{7}{7} + \frac{26}{7} = 5,7 \text{ [s]} \quad (6.14)$$

**Výpočet času rotace efektoru o 180°****Kde:**

$\omega_e$  – rychlost otáčení efektoru

$\varepsilon_e$  – zrychlení efektoru

$\phi_{eu}$  – dráha efektoru při ustálené rychlosti

$t_{ce}$  – celkový čas

**Vstupní hodnoty:**

$$\omega_e = 1,57 \text{ [rad.s}^{-1}\text{]}$$

$$\varepsilon_e = 3,14 \text{ [rad.s}^{-2}\text{]}$$

$$\phi_{eu} = 2,34 \text{ [rad]}$$

$$t_{ce} = 2 \cdot \frac{\omega_e}{\varepsilon_e} + \frac{\phi_{eu}}{\omega_e}$$

$$t_{ce} = 2 \cdot \frac{1,57}{3,14} + \frac{2,34}{1,57} = 2,49 \text{ [s]} \quad (6.15)$$

**Výpočet času zajetí trysky do čisticí polohy**

Čas zajetí i vyjetí trysky je stejný.

**Kde:**

$v_t$  – rychlost zdvihu trysky

$a_t$  – zrychlení trysky

$s_{tu}$  – dráha sloupku při ustálené rychlosti

$t_{ct}$  – celkový čas

Vstupní hodnoty:

$$v_t = 16 \text{ [mm.s}^{-1}\text{]}$$

$$a_t = 8 \text{ [mm.s}^{-2}\text{]}$$

$$s_{tu} = 114 \text{ [mm]}$$

$$t_{ct} = 2 \cdot \frac{v_t}{a_t} + \frac{s_{tu}}{v_t}$$

$$t_{ct} = 2 \cdot \frac{13}{6,5} + \frac{53}{13} = 9,13 \text{ [s]} \quad (6.16)$$

**Výpočet času přejetí nad další clonku**

Vzdálenost mezi jednotlivými clonkami v řadě je 150 mm

**Kde:**

$v_t$  – rychlost posuvu lin. motoru

$a_t$  – zrychlení lin. motoru

$s_{tu}$  – dráha lin. motoru při ustálené rychlosti

$t_{ct}$  – celkový čas přejetí nad další clonku

**Vstupní hodnoty:**

$$v_c = 100 \text{ [mm.s}^{-1}\text{]}$$

$$a_c = 50 \text{ [mm.s}^{-2}\text{]}$$

$$s_{cu} = 50 \text{ [mm]}$$

$$t_{ct} = 2 \cdot \frac{v_c}{a_c} + \frac{s_{cu}}{v_c}$$

$$t_{ct} = 2 \cdot \frac{13}{6,5} + \frac{53}{13} = 4,5 \text{ [s]} \quad (6.17)$$

operace	Čas [s]
1. Zajištění efektoru na doraz do clonky	8
2. Vysunutí laserového měřiče	5,7
3. Měření laserového měřiče 360°	8
4. Zasunutí laserového měřiče	5,7
5. Vysunutí efektoru	8
6. Otočení efektoru o 180°	2,5
7. Zajištění trysky do čisticí polohy	9,13
8. Čištění clonky	10
9. Vyjetí trysky	9,13
10. Otočení efektoru o 180°	2,5
11. Zajištění efektoru na doraz clonky	8
12. Vysunutí laserového měřiče	5,7
13. Měření laserového měřiče 360°	8
14. Zasunutí laserového měřiče	5,7
15. Vysunutí efektoru	8
16. Přejezd ramena nad další clonku	4,5
Čas čištění jedné clonky	108,56
Celkový čas jedné clonky po spojení pohybů	97,16
Celkový čas čištění výměníku (595 clonek)	16 [hod]

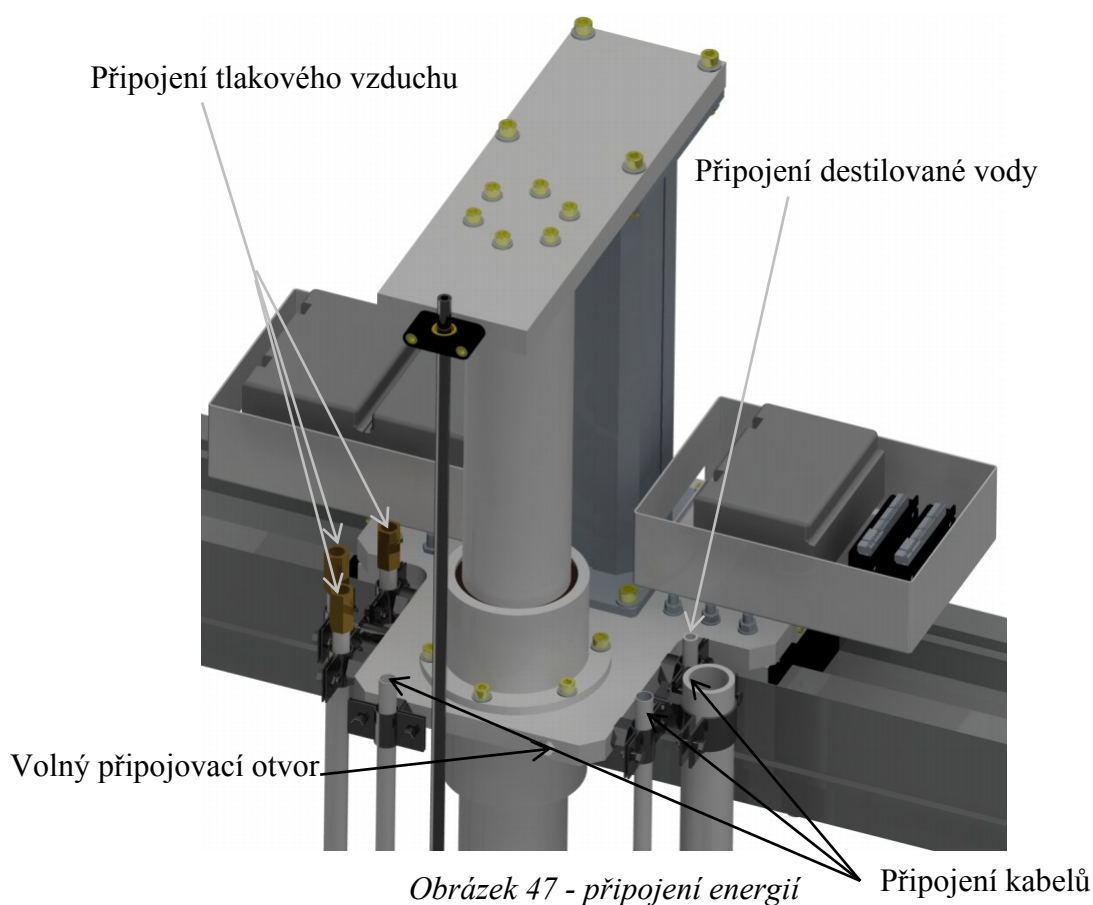
Pro zkrácení celkového času budou pohyby 4 a 5 a 14 a 15 probíhat zároveň. Tím je zkrácen celkový čas o 11,4 s na clonku a celkový čas se z původních 17:56 hodin sníží na 16 hodin. Tyto hodnoty jsou závislé na předpokladu, že každá z 595 clonek bude čištěna pouze jednou.

## 7.8 Montáž:

Doba montáže je limitovaná dobou tvrdnutí lepidla ve spojích a dosahuje až 168 hodin. Při rozmontování manipulátoru se nepočítá s rozebíráním lepených součástí, ani s celkovým rozebíráním efektoru. Tím dojde u opakované montáže k výraznému snížení času na odhadované na 4 hodiny.

Montáž probíhá nejprve složením základní konstrukce složenou z lineárních pohonů nad vodou a jejich vyrovnaním pomocí šroubů. Poté je složeno celé rameno spolu s laserovým měřičem, tryskou, všemi přívody a polohovacím sloupkem. Před montáží středové části je nezbytně nutné mít zapojené hadice vedení ke zdroji tlakového vzduchu, aby nedošlo ke vniku vody do zařízení. Při montování střední části musí být polohovací sloup vysunut minimálně 70 mm, kvůli možné kolizi se dnem výměníku.

Po ustavení středové části mohou být připojeny ostatní potřebné energie pro provoz zařízení.



## 8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navržení zařízení pro automatické čištění vnitřních průměrů clonek, nacházejících se pod vodní hladinou.

První část práce byla věnována zobrazení moderních trendů v oblasti čištění výměníků. Byly popsány základní metody, jejich specifikace a vhodnost použití pro jednotlivé aplikace. Zobrazeny byly základní metody měření a typy kinematických struktur, ze kterých se dále vycházelo. Po specifikaci tepelného výměníku byl navržen požadavkový list. Ten klade největší požadavky na kvalitu čištěného povrchu, utěsnění součástí a volbu vhodných konstrukčních materiálů. Podle těchto požadavků byly navrženy tři varianty řešení, které byly dále porovnány v hodnotové analýze. Varianta s nejvyšším počtem bodů byla podrobně rozpracována.

Rozpracovaná varianta je realizována laserovým měřičem, čisticí tryskou a lineárními pohony nad tepelným výměníkem. Při návrhu konstrukce bylo postupováno s ohledem na jednoduchou a levnou výrobu konstrukčních součástí. V konstrukci byla často použita technologie lepení, místo sváření a to zejména pro jednoduchost montáže a zaručené těsnosti spojů. Ve všech prostorách, kde je umístěna elektronika, je zajištěn přetlak. Z bezpečnostních důvodů a drahé elektronice je přetlak v komorách 2x vyšší, než je okolní tlak prostředí. Z toho důvodu může docházet k úniku vzduchu v místech těsnění. V kritických místech je těsnění zdvojeno.

Největší požadavky na přesnost jsou kladeny na výsuv laserového měřiče a polohování ramene nad clonky. Obal laseru je tvarovaný tak, aby dosedal na šikmou plochu clonky. Tím jsou také kompenzovány malé nepřesnosti polohování. Samotný laserový měřič je kvůli bezpečnosti zasunut a vysouvá jen pro potřeby měření. Při realizaci by bylo vhodné uvažovat o nahrazení řídicích jednotek Linak jednotkami vlastní výroby. Tím by došlo ke výraznému zmenšení řídicích jednotek, což by ušetřilo prostor na lineárním pohonu.

Životnost trysky je uváděna výrobcem na 20 – 60 hod. v závislosti na čistotě vody. Ta při minimální trvanlivosti a správné údržbě dostahuje k vyčištění clonek až u 12 tepelných výměníků.

Z důvodu velkého množství clonek byl kladen požadavek na co největší rychlost čištění. Navržená konstrukce splňuje nároky na kadenci, zadanou v požadavkovém listu, 8 min/ks. Z výpočtu časového průběhu čištění vyplývá, že největší čas zabírá zajištění a vyjetí trysky a samotné čištění. Čas samotného čištění tryskou bude muset být ověřen v praxi. Další časová ztráta vzniká při opětovném měření každé clonky po čištění. Odstraněním, nebo omezením této operace by mohlo být ušetřeno až 6 hodin z celkového pracovního času. Na zvážení je také opětovné měření pouze vybraných clonek.

Na závěr práce byly vypsány energie, potřebné pro provoz manipulátoru a rychlosti všech pohonů. Poměrně malé rychlosti polohování ramena jsou voleny kvůli délce ramene. To při vyšších rychlostech dosahuje velkých ohybů. Může zde dojít ke kmitání ramene a nutnosti větší časové prodlevy do jeho ustálení. Konec práce je věnován popisu a limitacím pro sestavení manipulátoru.

## 9 Seznam použitých pramenů

- [1] Boiler Tube Brush. *Wilson* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: [http://www.tcwilson.com/tube\\_cleaning/cleaning\\_heads/](http://www.tcwilson.com/tube_cleaning/cleaning_heads/)
- [2] How To select The Right Cleaning Brush. *Elliott* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.elliott-tool.com/how-to-select-the-right-cleaning-brush/>
- [3] Tube cleaners. *Conco* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.concosystems.com/products/tube-cleaners>
- [4] Plastic U-Tube Cleaner. 2014. *Conco Systems* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.concosystems.com/products/tube-cleaners/plastic-u-tube>
- [5] Banshee Tube Cleaners. *StoneAge Waterblast Tools* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.stoneagetools.com/tube-cleaning/rotary-tube-cleaners/>
- [6] Rigid Lance Machine. *StoneAge Waterblast Tools* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.stoneagetools.com/tube-cleaning/automated-systems/rigid-lance-machine/>
- [7] StoneAge Waterblast Tools. 2008. *Stoneage* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.stoneagetools.com/EBlast/archive/BN33tubenozzle.html>
- [8] Čištění výměníků tepla. *Termomont* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.termomont.cz/cisteni-tepelnych-vymeniku/>
- [9] Čištění výměníků tepla. *Orgon* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://cisteni-potrubu.cz/chemicke-cisteni-potrubu/cisteni-vymeniku-tepla/>
- [10] Heat Exchanger Chemical Cleaning. *MechPro* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://mechprousa.com/heat-exchanger/heat-exchanger-chemical-cleaning>
- [11] THULUKKANAM, Kuppan. 2013. *Heat exchanger design handbook*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN 978-143-9842-133.
- [12] Chlazení: Čištění tepelných výměníků. 2015. *Veskom* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.veskom.cz/cz/cisteni-tepelnych-vymeniku-chlazení>
- [13] Asse Prism. 2008. *Asse Prism* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: [http://www.prism-magazine.org/jan08/feature\\_02\\_photos.cfm](http://www.prism-magazine.org/jan08/feature_02_photos.cfm)

- [14] Stupeň krytí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Stupe%C5%88\\_kryt%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Stupe%C5%88_kryt%C3%AD)
- [15] Specifikace těsnicích materiálů. *Armat* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-tesnicich-materialu-epdm-silikon-ptfe-viton-nbr.pdf>
- [16] PROFILOVANÉ TĚSNĚNÍ VITON GEKA PLUS VITON. *Hadice a pryže od GMS* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.gms.cz/cz/vyrobek/30185-geka-plus-viton>
- [17] Porovnání laserových a ultrazvukových dálkoměrů. *Qtest* [online]. 2013 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/laserove-dalkomery/porovnani-laser-ultrazvuk.htm>
- [18] Laserový měřič RF 603. *Triangulární systém - RMT* [online]. 2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.rmt.cz/cz/produkty/procesni-instrumentace/mereni-vzdalenosti/triangularni-system/113-laserov-mi-rf-603.html>
- [19] Laserový metr. *Laser* [online]. 2011 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: [http://lasery.wz.cz/laserove\\_zamerovani\\_a\\_mereni\\_vzdalenosti.html](http://lasery.wz.cz/laserove_zamerovani_a_mereni_vzdalenosti.html)
- [20] SKAŘUPA, Jiří. 2007. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [21] Loctite 4090. 2015. *Loctite: průmyslová lepidla a tmely* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.loctite.cz/Loctite-6700.htm?nodeid=8803826302977>
- [22] Linear Actuator LA 36. 2015. *Linear Actuator technology* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.linak.com/products/linear-actuators.aspx?product=LA36>
- [23] MPA positioning sensors. 2015. *Sick* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <https://www.mysick.com/saqqara/im0046952.pdf>
- [24] Indukční snímač. 2015. *Baluff* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [http://www.balluff.com/balluff/MCZ/cs/products/product\\_detail.jsp#/159111](http://www.balluff.com/balluff/MCZ/cs/products/product_detail.jsp#/159111)
- [25] MAXON MOTOR. 2015. *DC motors and drive systems* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.maxonmotor.com/>



- [26] Třídílná spojka Oldham. 2015. *T.E.A. Technik s.r.o.* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.teatechnik.cz/spojky-oldham/>
- [27] BCM Sensor technologies. 2015. *BCM Sensor technologies* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.bcmsensor.com/sub-categories.php?secid=26>
- [28] Adafruit HTU21D-F Temperature & Humidity Sensor Breakout Board. 2015. *SnailShop* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.snailshop.cz/vlhkost/1394-adafruit-htu21d-f-temperature-humidity-sensor-breakout-board.html>
- [29] Single - action actuator. 2015. *Nautic expo* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.nauticexpo.com/prod/linak/single-action-actuator-hydraulic-system-30329-367518.html>
- [30] LINAK. 2015. *Linear actuator technology* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.linak.com/>
- [31] Nerezové a kryogenní hadice TINKAIR. 2013. *Tereval* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.tereval.cz/cz/nerezove-a-kryogenni-hadice-tinkair-1404041651.html>
- [32] Medium pressure tubing. 2013. *Parker Autoclave Engineers* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: [http://www.autoclave.com/products/fittings\\_and\\_tubing/medium/mp\\_tubing.html](http://www.autoclave.com/products/fittings_and_tubing/medium/mp_tubing.html)
- [33] MS UNIFIX. 2015. *Den braven* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.denbraven.cz/ms-polymerni-lepidla-a-tmely/0441-ms-unifix-na-vsechna-tmeleni-a-lepeni-51-cz5.html>
- [34] Nerez Material. 2015. *Nerez Material* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.nrezmateral.cz/trubka-pr-108-0x3-0-wst-nr-1-4301-svarovana-eu-vyrobnidelka-6000>
- [35] Ověření funkčnosti ultrazvukového detektoru vzdálenosti. *Posterous.sk* [online]. 2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.posterous.sk/?p=9411>
- [36] *Igus* [online]. 2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [www.igus.cz](http://www.igus.cz)

**10 Seznam použitých obrázků**

OBRÁZEK 1 - VYMĚNITELNÉ KARTÁČE [2] .....	11
OBRÁZEK 2 - ČIŠTĚNÍ PROJEKILEM [4].....	12
OBRÁZEK 3 - ČIŠTĚNÍ TRYSKAMI [7] .....	13
OBRÁZEK 4 - STAV PO CHEM. ČIŠTĚNÍ [12] .....	14
OBRÁZEK 5 - STAV PŘED CHEM. ČIŠTĚNÍM [12] .....	14
OBRÁZEK 6 - PODVODNÍ ROBOT [13] .....	14
OBRÁZEK 7 - TĚSNĚNÍ VITON [16].....	16
OBRÁZEK 8 – PRINCIP LASEROVÉHO MĚŘENÍ [18].....	17
OBRÁZEK 9 - PRINCIP ULTRAZVUKU [35] .....	18
OBRÁZEK 10 - KINEMATICKÉ STRUKTURY [20].....	19
OBRÁZEK 11 – TEPELNÝ VÝMĚNÍK .....	21
OBRÁZEK 12 - ROZMĚRY CLONKY .....	21
OBRÁZEK 13 - POPIS VARIANTY A .....	22
OBRÁZEK 14 - OTÁČENÍ EFEKTORU .....	23
OBRÁZEK 15 – POPIS EFEKTORU S KARTÁČEM.....	24
OBRÁZEK 16 - POPIS VARIANTY B .....	25
OBRÁZEK 17 - UPEVNĚNÍ RAMENA .....	26
OBRÁZEK 18 - OTÁČENÍ EFEKTORU .....	26
OBRÁZEK 19 - POPIS EFEKTORU S TRYSKOU .....	27
OBRÁZEK 20 - POPIS VARIANTY C .....	28
OBRÁZEK 21 – ROTAČNÍ POHON RAMENA.....	29
OBRÁZEK 22 – POPIS EFEKTORU S KARTÁČEM.....	30
OBRÁZEK 23 - POPIS HORNÍ ČÁSTI EFEKTORU .....	31
OBRÁZEK 24 - VYHODNOCENÍ NAVRŽENÝCH VARIANT .....	36
OBRÁZEK 25 - VYTVRZENÍ LEPIDLA LOCTITE 4090 [21].....	37
OBRÁZEK 26 - POPIS LASEROVÉHO MĚŘIČE .....	38
OBRÁZEK 27 - LINAK LA 36 [22].....	41
OBRÁZEK 28 – SICK MPA 107 [23] .....	41
OBRÁZEK 29 - DETAIL LASERU (BEZ POHONU MAXON).....	42
OBRÁZEK 30 – VEDENÍ LASERU .....	44
OBRÁZEK 31 - SENZOR TLAKU 101B (A196) [27] .....	45
OBRÁZEK 32 - SENZOR VLHKOSTI [28] .....	45
OBRÁZEK 33 - DETAIL TRYSKY .....	47
OBRÁZEK 34 – LINEÁRNÍ POHON LA12 [29] .....	48
OBRÁZEK 35 - KLUZNÉ LOŽISKO[36] .....	51
OBRÁZEK 36 – OTÁČENÍ EFEKTORU.....	52
OBRÁZEK 37 - SPOJ TRUBEK .....	53
OBRÁZEK 38 - DEFORMACE TRUBKY .....	53

OBRÁZEK 39 - KONSTRUKCE MANIPULÁTORU .....	54
OBRÁZEK 40 - LINAK LP25 [30] .....	56
OBRÁZEK 41 - STŘEDNÍ ČÁST S POLOHOVACÍM SLOUPEM .....	57
OBRÁZEK 42 – POHON RAVEO A PŮSOBÍCÍ SÍLY .....	58
OBRÁZEK 43 - ŘÍDICÍ JEDNOTKA ECOVARIO® 414 .....	59
OBRÁZEK 44 - NEREZOVÁ HADICE TINKAIR S OPLETEM [31].....	60
OBRÁZEK 45 - ZNÁZORNĚNÍ POHYBŮ MANIPULÁTORU .....	62
OBRÁZEK 46 - LICHOBĚŽNÍKOVÝ PRŮBĚH POHYBU .....	63
OBRÁZEK 47 - PŘIPOJENÍ ENERGIÍ .....	68

## **11 Seznam příloh**

Příloha A: Obrázek 3D modelu manipulátoru

Příloha B: Data sheet pohonu Maxon v laseru

Příloha C: Data sheet pohonu Maxon k otáčení efektoru

Příloha D: Kontrola lepeného spoje

Sestavný výkres laserového měřiče

Sestavný výkres čistící trysky

Výrobní výkres nerezové desky

Výrobní výkres obalu laserového měřiče

DVD ROM: Ryšavý, M. Diplomová práce

## 12 Přílohy

### A: Obrázek 3D modelu manipulátoru



### Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanu Miholovi, Ph.D. za předání spousty nových poznatků a rad při studiu i tvorbě diplomové práce.